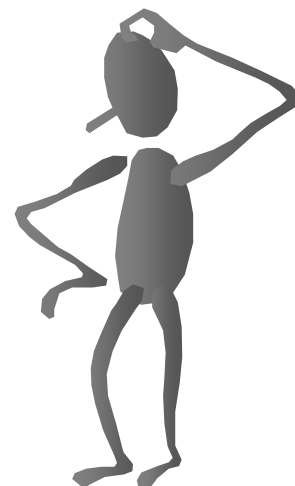
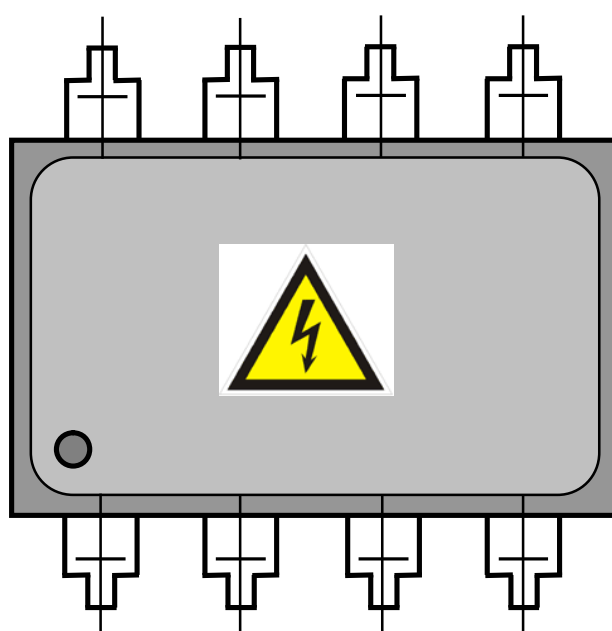


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до виконання лабораторних робіт  
із навчальної дисципліни**

**«КОМП'ЮТЕРНА ЕЛЕКТРОНІКА»**

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності  
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології)*



Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт із навчальної дисципліни «Комп'ютерна електроніка» (для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Ю. П. Колонтаєвський, Д. В. Тугай. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 128 с.

Укладачі: канд. техн. наук Ю. П. Колонтаєвський,  
канд. техн. наук Д. В. Тугай

Рецензент О. В. Грицунов, доктор фізико-математичних наук наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки (ХНУРЕ)

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 1 від 29.09.2017 р.*

## ЗМІСТ

ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ	4
ВСТУП .....	5
Лабораторна робота № 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ .....	6
Лабораторна робота № 2 ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКАСКАДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ .....	20
Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ЇХНІХ ТИПОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ .....	33
Лабораторна робота № 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ НА ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ (ІМС) .....	44
Лабораторна робота № 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ІМС .....	58
Лабораторна робота № 5М ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ (МПП) .....	71
Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА (ЦАП) .....	86
Лабораторна робота ДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА (АЦП) .....	99
Лабораторна робота № 6 ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ .....	108
Додаток А ЗМІСТ ЗВІТУ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ .....	123



## **ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

**⚠** До виконання лабораторних робіт студенти допускаються після інструктажу з техніки електричної та протипожежної безпеки у лабораторії промислової електроніки, про що обов'язково робиться відповідний запис до журналу реєстрації інструктажів з питань охорони праці.

**⚠** Напруги на доступних для дотику виводах лабораторного устаткування не перевищують допустимих значень у 42 В для змінного струму та 110 В для постійного. Незважаючи на це, оскільки живлення устаткування та вимірювальних приладів здійснюється від мережі 220 В напруги змінного струму, при виконанні робіт не слід доторкатися одночасно до двох одиниць устаткування або приладів, а також до труб центрального опалення та використовувати у якості указок струмопровідні предмети (у т. ч. олівці з графітовим стрижнем).

**⚠** Забороняється розміщувати на робочих місцях одяг та інші особисті речі, що не використовуються для роботи.

**⚠** Забороняється без дозволу викладача переміщуватись на інші робочі місця, покидати робочі місця та межі лабораторії.

**⚠** При виявленні несправності устаткування та вимірювальних приладів або відхилень у їхній роботі, їх необхідно знеструмити і повідомити про це викладачеві.

**⚠** У разі виникнення нещасного випадку необхідно вимкнути живлення лабораторії, надати потерпілому першу допомогу, негайно сповістити викладача.

**⚠** У разі виникнення загоряння у лабораторії необхідно вимкнути живлення лабораторії та загасити полум'я вогнегасником, негайно сповістити викладача.

**⚠** Після закінчення виконання робіт необхідно вимкнути живлення устаткування та вимірювальних приладів, навести лад на робочому місці, сповістити викладача.

## ВСТУП

Методичні вказівки складено на основі робочої програми з дисципліни «Комп'ютерна електроніка. Він призначений для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології і напряму підготовки 6.050201 – Системна інженерія

Метою виконання лабораторних робіт є формування у студентів знань і практичних навиків дослідження напівпровідникових електронних приладів і типових каскадів підсилювачів напруги змінного та постійного струмів; пристроїв імпульсної, цифрової та перетворювальної техніки.

У результаті виконання даних робіт студенти повинні засвоїти принципи дії транзисторів різного типу та типових електронних підсилювачів, імпульсних пристроїв, комбінаційних і послідовнісних цифрових пристроїв жорсткої логіки та програмованих мікропроцесорних пристроїв, що складають основу сучасної комп'ютерної електроніки і застосовуються у пристроях автоматики й обчислювальної техніки.

Методика проведення лабораторних робіт пов'язана з наявністю необхідного устаткування і організацією робочих місць у лабораторії промислової електроніки кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки, кількістю навчальних груп, які одночасно приступають до виконання лабораторних робіт.

Студенти повинні заздалегідь готуватися до занять у лабораторії, вивчаючи відповідні розділи теоретичного курсу за лекційними записами і навчальною літературою та знайомлячись зі змістом лабораторної роботи за даними методичними вказівками. Також заздалегідь *необхідно заготовити таблиці для фіксації результатів експериментів і кальку або інший подібний прозорий матеріал для зняття осцилограм.*

Перед виконанням лабораторної роботи студенти знайомляться на робочому місці з приладами та устаткуванням. Експериментальна частина виконується відповідно до методичних вказівок під керівництвом і за контролем викладача з дотриманням правил техніки безпеки.

Результати вимірів і осцилограми студенти обробляють у лабораторії, аналізуючи результати кожного дослідження.

За результатами виконання лабораторної роботи складається звіт (форму наведено у додатку А). Звіт повинен бути складений чітко й акуратно. Варто приділяти увагу формулюванню висновків за виконаною роботою, у яких необхідно зіставити результати експериментальних досліджень з відомими з теоретичного курсу закономірностями.

*Схеми електричні принципи виконуються згідно з вимогами державних стандартів і з застосуванням креслярського знаряддя. У схемах, формулах і таблицях необхідно використовувати стандартні умовні позначення.*

Для здачі лабораторної роботи студент повинен представити повністю оформлений звіт, уміти пояснити будь-який з проведених дослідів і відповісти на контрольні запитання викладача.

# Лабораторна робота № 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

### 1 Мета роботи

- 1) Дослідження статичних характеристик біполярного транзистора  $n-p-n$  типу.
- 2) Дослідження статичних характеристик польового транзистора з керуючим  $p-n$  переходом з каналом  $n$ -типу.

### 2 Обладнання

- 1) Стенд лабораторний № 1, 3.
- 2) Вольтметр цифровий В7-27.
- 3) Мультиметр ВР11.
- 4) Осцилограф С1-93 (С1-83).

### 3 Зміст роботи

- 1) Зняти і побудувати статичні вхідні і вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ) біполярного транзистора.
- 2) Зняти і побудувати статичні вхідні і вихідні вольт-амперні характеристики (ВАХ) польового транзистора.

### 4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомитись з робочим місцем, устаткуванням і приладами.
- 4.2 Ввімкнути вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у ліве положення.

- 4.3 Зняття статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ) біполярного транзистора  $n-p-n$  типу

4.3.1 Зняття статичних ВАХ біполярного і польового транзисторів проводити за допомогою схеми, що наведена на рисунку 1.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного). Міліамперметр  $PA1$ , вольтметр  $PVI$  і мікроамперметр  $PA2$  встановлені на лицьовій панелі стенда. Елементи комутації і регулювання вмонтовані в мнемосхему.

Для зняття ВАХ біполярного транзистора у схемі з СЕ перемикач  $SA$  встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа поруч із транзистором  $VTI$ , що підмикається до джерела живлення, вимірювальних приладів і елементів регулювання). До клем  $X$  і  $\perp$  підімкнути мультиметр (або цифровий вольтметр), межу вимірювання якого встановити орієнтовно 2 В, і задати режим вимірювання напруги постійного струму.

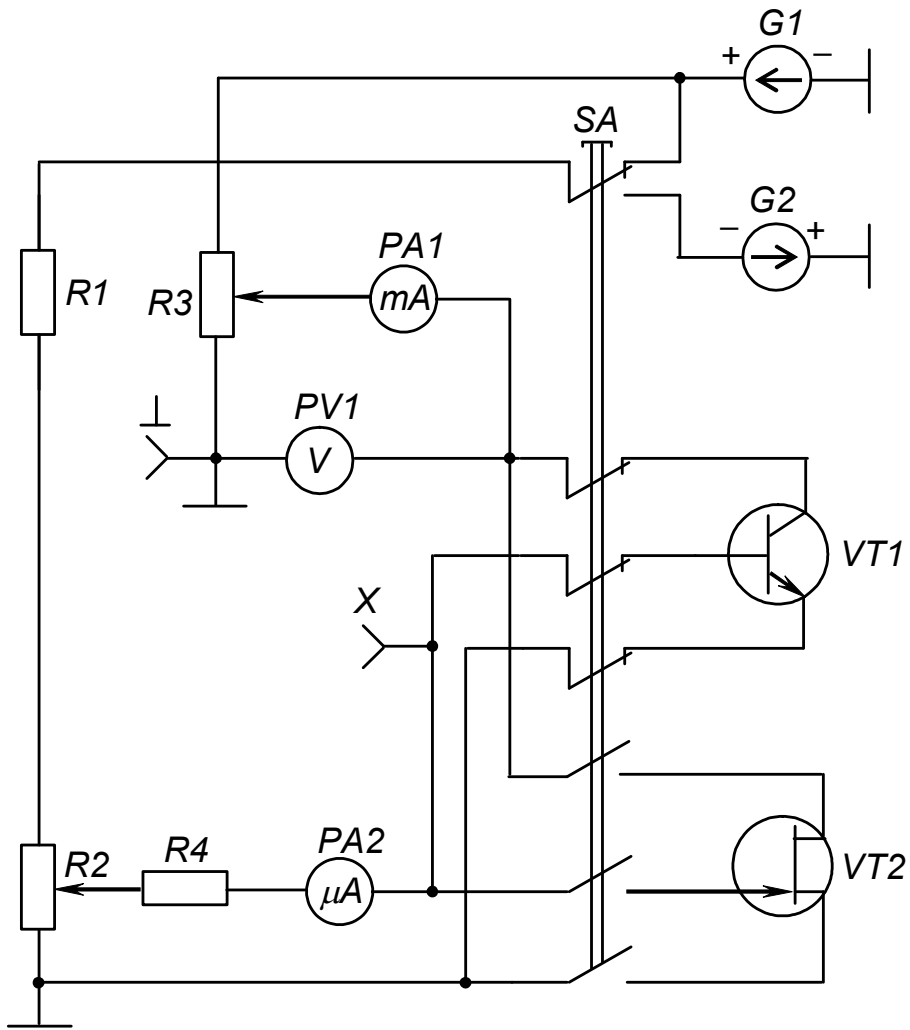


Рисунок 1.1 – Схема для зняття ВАХ біполярного і польового транзисторів

Зібрану у такий спосіб схему дослідів наведено на рисунку 1.2.

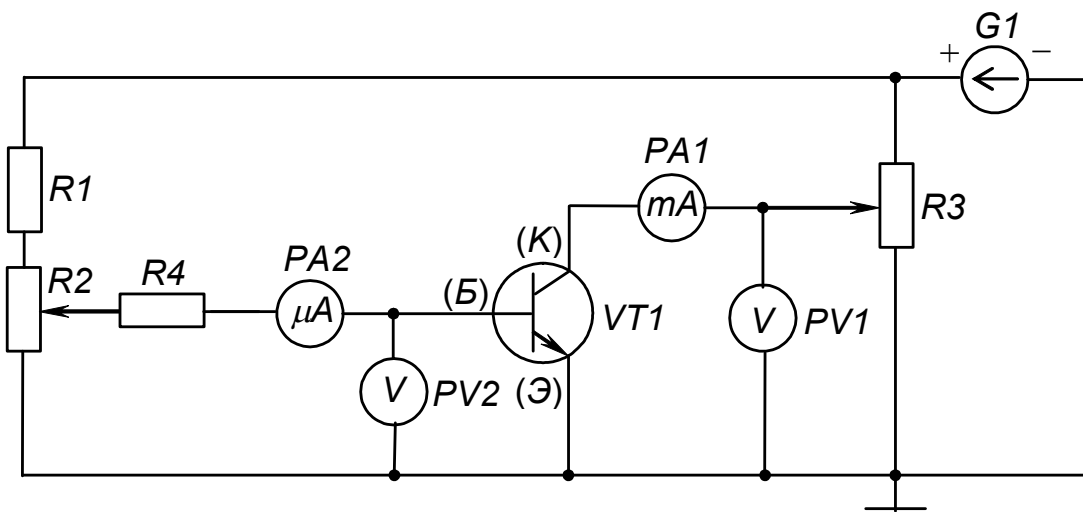


Рисунок 1.2 – Схема дослідів зняття ВАХ біполярного транзистора *n-p-n* типу

4.3.2 Зняти сімейство вхідних ВАХ  $I_B = f(U_{BE})$  при значеннях  $U_{KE}$  рівних 0; 5 і 10 В.

Фіксовані значення  $U_{KE}$  задавати обертанням ручки резистора  $R_3$  за годинниковою стрілкою, починаючи з крайнього лівого положення, і контролюючи за вольтметром  $PV1$ .

Обертаючи ручку резистора  $R_2$  за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення  $I_B$  за мікроамперметром  $PA2$  і фіксувати відповідні значення  $U_{BE}$  за вольтметром  $PV2$ .

Результати вимірів занести в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати вимірів вхідних ВАХ біполярного транзистора

$I_B, \text{мкА}$	0	5	10	20	30	40	50	60	$U_{KE}, \text{В}$
$U_{BE}, \text{В}$									0
									5
									10

Примітка. У таблиці 1.1 позиції, що відповідають значенням  $I_B$ , і не можуть бути встановлені за допомогою резистора  $R_2$ , не заповнюювати.

4.3.3 Зняти сімейство вихідних ВАХ  $I_K = f(U_{KE})$  при фіксованих значеннях струму  $I_B$  рівних 0; 10; 30; 50 і 60 мкА, що задаються резистором  $R_2$  за мікроамперметром  $PA2$ .

Для кожного фіксованого значення  $I_B$ , обертаючи ручку резистора  $R_3$  за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення  $U_{KE}$  за вольтметром  $PV1$  й фіксувати за міліамперметром  $PA1$  відповідні значення струму колектора  $I_K$ . Результати вимірів занести у таблицю. 1.2.

Таблиця 1.2 – Результати вимірів вихідних ВАХ біполярного транзистора

$U_{KE}, \text{В}$	0	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	$I_B, \text{мкА}$
$I_K, \text{мА}$								0
								10
								30
								50
								60

#### 4.4 Зняття статичних вольт-амперних характеристик (ВАХ)

польового транзистора з керуючим  $p-n$  переходом

4.4.1 Для одержання схеми досліду зняття статичних ВАХ польового транзистора з СВ, наведеної на рисунку 1.3, перемикач  $SA$  встановити у натиснуте положення (світиться сигнальна лампа поруч з

транзистором  $VT2$ ). Зверніть увагу на те, що полярність напруги  $U_{3B}$  негативна (необхідно відповідно підімкнути мультиметр  $PV2$ ).

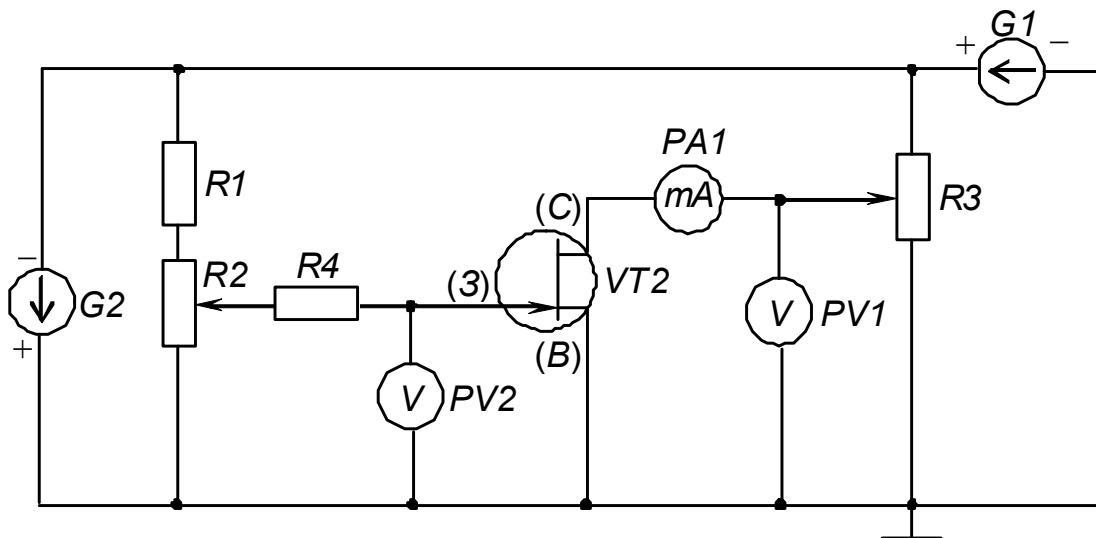


Рисунок 1.3 – Схема досліду зняття ВАХ польового транзистора з керуючим  $p-n$  переходом

4.4.2 Зняти сімейство стік-затворних ВАХ  $I_C = f(U_{3B})$  при фіксованих значеннях напруги  $U_{CB}$  рівних 1; 5 і 10 В, що задаються резистором  $R_3$  за вольтметром  $PV1$ .

Для кожного фіксованого значення  $U_{CB}$ , обертанням ручки резистора  $R_2$  за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення  $U_{3B}$  за вольтметром  $PV2$  і фіксувати за міліамперметром  $PA1$  відповідні значення струму стоку  $I_C$ .

Результати вимірів занести у таблицю 1.3.

Таблиця 1.3 – Результати вимірів стік-затворних ВАХ польового транзистора

$U_{3B}, \text{В}$	0	-0,2	-0,4	-0,6	-0,8	-1,0	-1,2	-1,4	-1,8	$U_{CB}, \text{В}$
$I_C, \text{мА}$										1
										5
										10

4.4.3 Зняти сімейство вихідних (стокових) характеристик  $I_C = f(U_{3B})$  при фіксованих значеннях напруг на затворі  $U_{3B}$ , що задаються резистором  $R_2$  за цифровим вольтметром  $PV2$ .

Для кожного фіксованого значення  $U_{3B}$ , обертаючи ручку резистора  $R_3$  за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення  $U_C$  за вольтметром  $PV1$  і фіксувати за міліамперметром  $PA1$  відповідні значення струму  $I_C$ .

Результати вимірів занести у таблицю 1.4.

Таблиця 1.4 – Результати вимірів вихідних ВАХ польового транзистора

$U_{CB}, B$	0	0,25	0,5	1,0	2,0	5,0	10,0	$U_{3B}, B$
$I_C, mA$								0
								-0,25
								-0,5
								-0,75
								-1,0
								-1,25

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиці 1.1 побудувати сім'ю вхідних ВАХ біполярного транзистора. Зробити висновок про вплив значення колекторної напруги  $U_{KE}$  на положення вхідної характеристики.

5.2 За даними таблиці 1.2 побудувати сім'ю вихідних ВАХ біполярного транзистора, зробити висновок про вплив значення струму бази  $I_B$  на положення вихідної характеристики.

5.3 За даними таблиці 1.3 побудувати сім'ю стік-затворних ВАХ польового транзистора. Зробити висновок про вплив значення напруги  $U_{CB}$  на положення стік-затворної характеристики.

5.4 За даними таблиці 1.4 побудувати сім'ю стокових (вихідних) ВАХ польового транзистора. Зробити висновок про вплив значення напруги на затворі  $U_{3B}$  на положення стокової характеристики. Порівняти вид стокових характеристик польового транзистора і вихідних характеристик біполярного транзистора.

5.5 За вихідними характеристиками біполярного транзистора визначити його коефіцієнт підсилення струму

$$\beta = \frac{I_K}{I_B}.$$

5.6 За стік-затворними характеристиками польового транзистора визначити крутизну характеристики керування

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \right|_{U_{CB} = const} \quad \text{при } U_{CB} = 5 B,$$

а за стоковими характеристиками – внутрішній опір транзистора

$$R_i = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_3 = const} \quad \text{при } U_{3B} = -0,5 B.$$

## 6 Пояснення до роботи

Біполярний транзистор являє собою електронний напівпровідниковий прилад, що має два взаємодіючих електронно-діркових переходи і складається з трьох областей: емітера, бази і колектора.  $p-n$  перехід, що утворюється на межі областей емітер-база, називається емітерним, а на межі база-колектор – колекторним. Провідність бази може бути як електронною ( $n$ -типу), так і дірковою ( $p$ -типу). Відповідно розрізняють транзистори  $p-n-p$  та  $n-p-n$  типу.

На рисунку 1.4 схематично наведено будову і умовні графічні позначення транзисторів  $n-p-n$  та  $p-n-p$  типу.

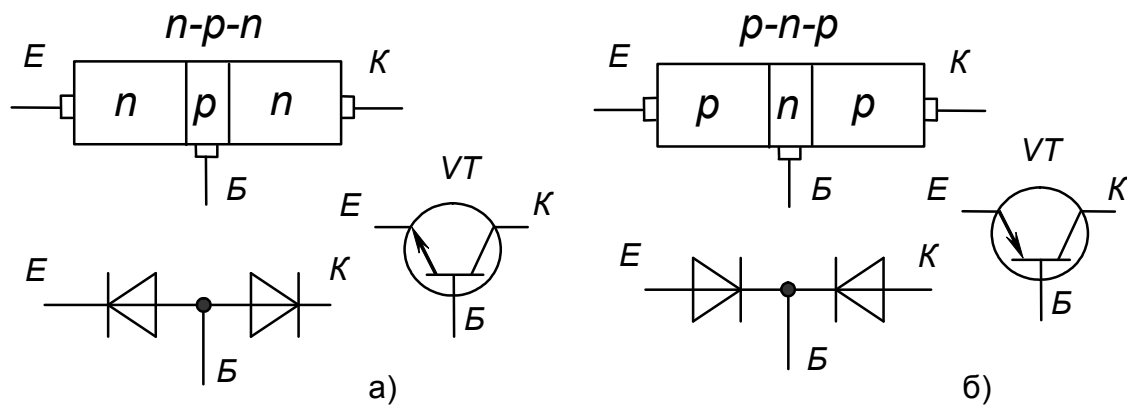


Рисунок 1.4 – Будова і умовні позначення транзисторів  $n-p-n$  (а) та  $p-n-p$  (б) типів

Для забезпечення ефективного впливу емітерного переходу на колекторний, а отже забезпечення підсилюючих властивостей транзистора, необхідне виконання наступних основних вимог (реалізуються технологічно при виробництві):

- 1) база повинна бути багато тоншою за довжину дифузійного пробігу інжектованих до неї з емітера носіїв електричного заряду;
- 2) концентрація основних носіїв у базі повинна бути значно меншою за концентрацію основних носіїв в емітері, а концентрація основних носіїв у колекторі повинна бути багато меншою, ніж в емітері;
- 3) площа колекторного переходу повинна бути у декілька разів більшою за площу емітерного переходу.

Принцип дії транзисторів обох типів однаковий. Розходження полягає лише у тому, що в транзисторі  $p-n-p$  типу основний струм, що тече через структуру, створюється дірками, інжектованими з емітера, а у транзисторі  $n-p-n$  типу – електронами (напрямок протікання струму через транзистор вказує стрілка на його умовному позначенні).

Розглянемо принцип дії біполярного транзистора на прикладі транзистора структури  $n-p-n$  типу.

Якщо до приладу не прикладена зовнішня напруга, через обидва  $p-n$  переходи протікають струми дифузії і дрейфу, як і в звичайному діоді. Оскільки вони врівноважують один одного, сумарний струм через кожен  $p-n$  перехід, а значить і через весь прилад дорівнює нулю.

Підмикання джерела  $E_K$ , як показано на рисунку 1.5, а, зміщує колекторний перехід у зворотному напрямку і, у результаті, через нього протікає невеликий струм, зумовлений дрейфом через перехід неосновних носіїв, що виникають з-за термогенерації (у даному разі, електронів) – струм  $I_{K0}$ .

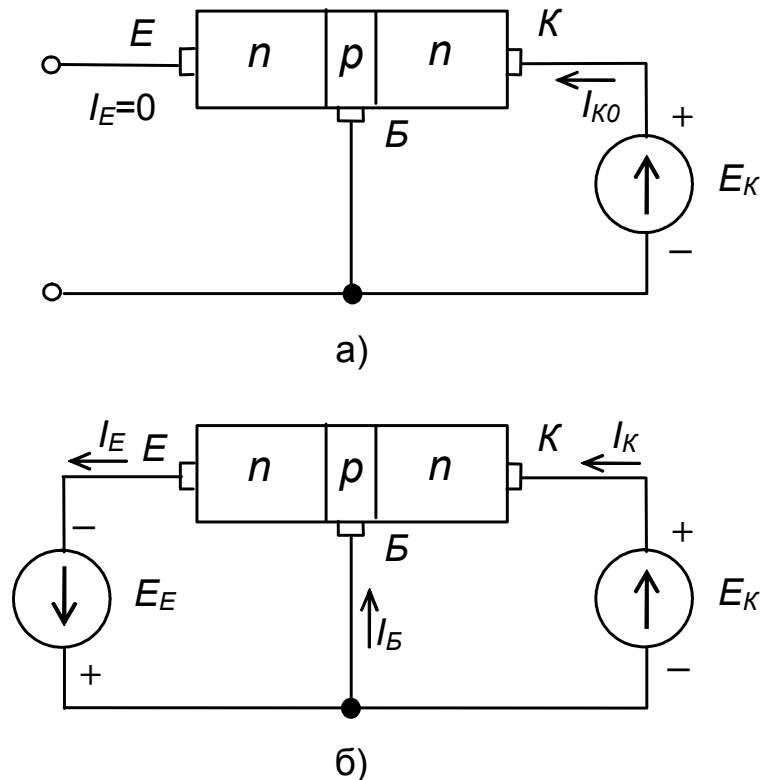


Рисунок 1.5 – Спрощена схема вмикання транзистора

Якщо підімкнути до транзистора також джерело  $E_E$  (між базою і емітером), як показано на рисунку 1.5, б, емітерний перехід зміщується у прямому напрямку, і через нього до бази з емітера інjektується велика кількість носіїв (електронів) – струм  $I_E$ .

Через те, що у базі основних носіїв (дірок) набагато менше, ніж у емітері (електронів) і товщина бази незначна, тільки невелика частина електронів, що надходять з емітера в базу, буде встигати рекомбінувати з дірками і створювати струм бази  $I_B$ . Електрони, що залишилися, починають дифундувати у базі за всіма напрямками, у тому числі і до колекторного переходу. Потрапляючи в область колектора, вони підпадають під дію поля джерела  $E_K$  і спрямовуються до його позитивного електроду (вони тут є потоком основних носіїв заряду), створюючи струм колектора  $I_K$ .

Оскільки виходить, що струм бази (керуючого електрода) набагато менший струму колектора (струму силового кола), транзистор має підсилюючі властивості.

Струми електродів транзистора зв'язані співвідношенням:

$$I_E = I_B + I_K, \quad (1.1)$$

де  $I_E$  – струм емітера;  
 $I_B$  – струм бази;  
 $I_K$  – струм колектора.

Відношення струму колектора до струму емітера називається коефіцієнтом передачі струму емітера

$$\alpha = \frac{I_K}{I_E}. \quad (1.2)$$

Відношення колекторного струму до базового називається коефіцієнтом підсилення струму

$$\beta = \frac{I_K}{I_B} = \frac{I_K}{I_E - I_K} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (1.3)$$

У сучасних транзисторів  $\alpha$  знаходиться у межах від 0,9 до 0,99, а  $\beta$  – від 10 до 100 і більше.

Зв'язок струмів електродів біполярного транзистора і прикладених між його електродами напругами ілюструється статичними вольт-амперними характеристиками (ВАХ): вхідними і вихідними. Вид цих характеристик залежить від схеми вмикання транзистора.

Залежно від того, який з електродів транзистора є спільною точкою за змінним струмом для вхідного і вихідного кіл, можливі три способи вмикання: зі спільною базою (з СБ) – рисунок 1.6, а; зі спільним емітером (з СЕ) – рисунок 1.7, б; зі спільним колектором (з СК) – рисунок 1.6, в.

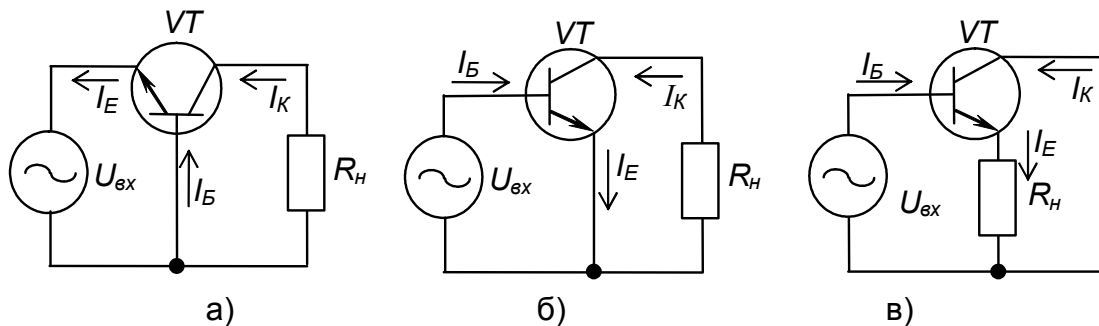


Рисунок 1.6 – Схеми вмикання транзистора: а) з СБ; б) з СЕ; в) з СК

Найбільше поширення у підсилюючих каскадах та імпульсних пристроях одержала схема з СЕ як така, що дає найбільше підсилення за потужністю, забезпечуючи підсилення і за напругою, і за струмом.

Вхідні і вихідні ВАХ транзистора, ввімкненого за схемою з СЕ, наведено на рисунку 1.7.

Вхідні характеристики показують зв'язок між струмом бази  $I_B$  і напругою, прикладеною між емітером і базою  $U_{BE}$ .

Вхідна характеристика, як видно з (рисунку 1.7, а, при  $U_{KE} = 0$  подібна до прямої гілки ВАХ діода. При  $U_{KE} > 0$  вхідні характеристики дещо зміщуються вправо. Зменшення струму бази при цьому пояснюється зменшенням рекомбінацій у базі при її звуженні за рахунок розширення запираючого шару (зворотно зміщеного колекторного  $p-n$  переходу).

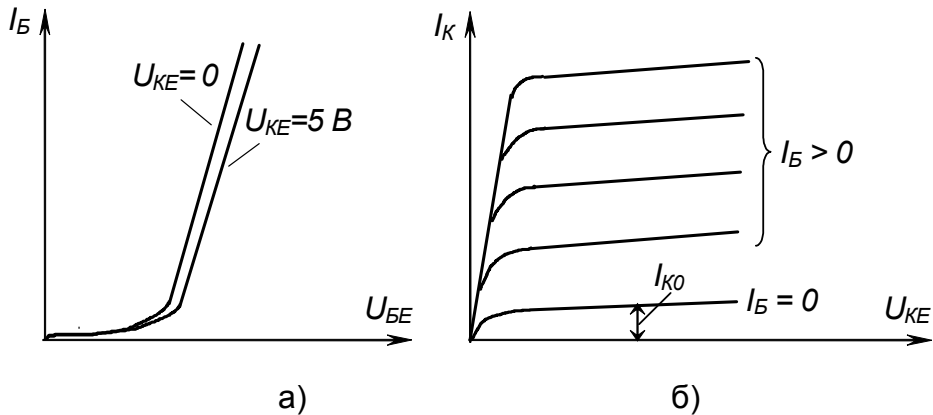


Рисунок 1.7 – ВАХ транзистора, увімкненого за схемою з СЕ:  
а) вхідні; б) вихідні

Вихідні статичні характеристики, наведені на рисунку 1.7, б, показують зв'язок між струмом колектора  $I_K$  та напругою між колектором і емітером  $U_{KE}$  залежно від значення струму бази  $I_B$ . При  $I_B = 0$  маємо ВАХ зворотно зміщеного колекторного  $p-n$  переходу. Зі збільшенням  $I_B$  струм колектора збільшується. При цьому його значення залежить від значення  $I_B$  і (десь при  $U_{KE} > 1$  В) майже не залежить від значення  $U_{KE}$ , бо визначається тільки кількістю носіїв, що після інжекції із емітера в базу дифундували із бази в колектор.

На рисунку 1.8, а показано лінію навантаження за постійним струмом (динамічну характеристику) і зони, що відповідають трьом характерним режимам роботи транзистора. Рівняння лінії навантаження має такий вигляд:

$$U_{KE} = E_K - I_K R_K, \quad (1.4)$$

де  $E_K$  – напруга живлення;

$R_K$  – навантаження транзистора за постійним струмом.

Лінія навантаження за постійним струмом проводиться через точки:

$E_K$ , що відповідає  $I_K = 0$  (режиму холостого ходу);

$I_K = E_K / R_K$ , що відповідає  $U_{KE} = 0$  (режиму короткого замикання).

Точка *a* відповідає режиму відсічки транзистора, при якому струм у колі навантаження дуже малий, внаслідок чого майже вся напруга джерела живлення прикладається до транзистора.

Точка *b* відповідає режиму насичення транзистора. У цьому режимі на транзисторі падає незначна напруга (до 0,1–0,3 В), що практично не залежить від зміни керуючого струму бази. Відповідно напруга і струм у колі навантаження залишаються незмінними.

Проміжок між точками *a* і *b* відповідає активному режиму.

Режими насичення і відсічки використовуються в ключових (імпульсних) схемах, а активний режим – у лінійних підсилювачах.

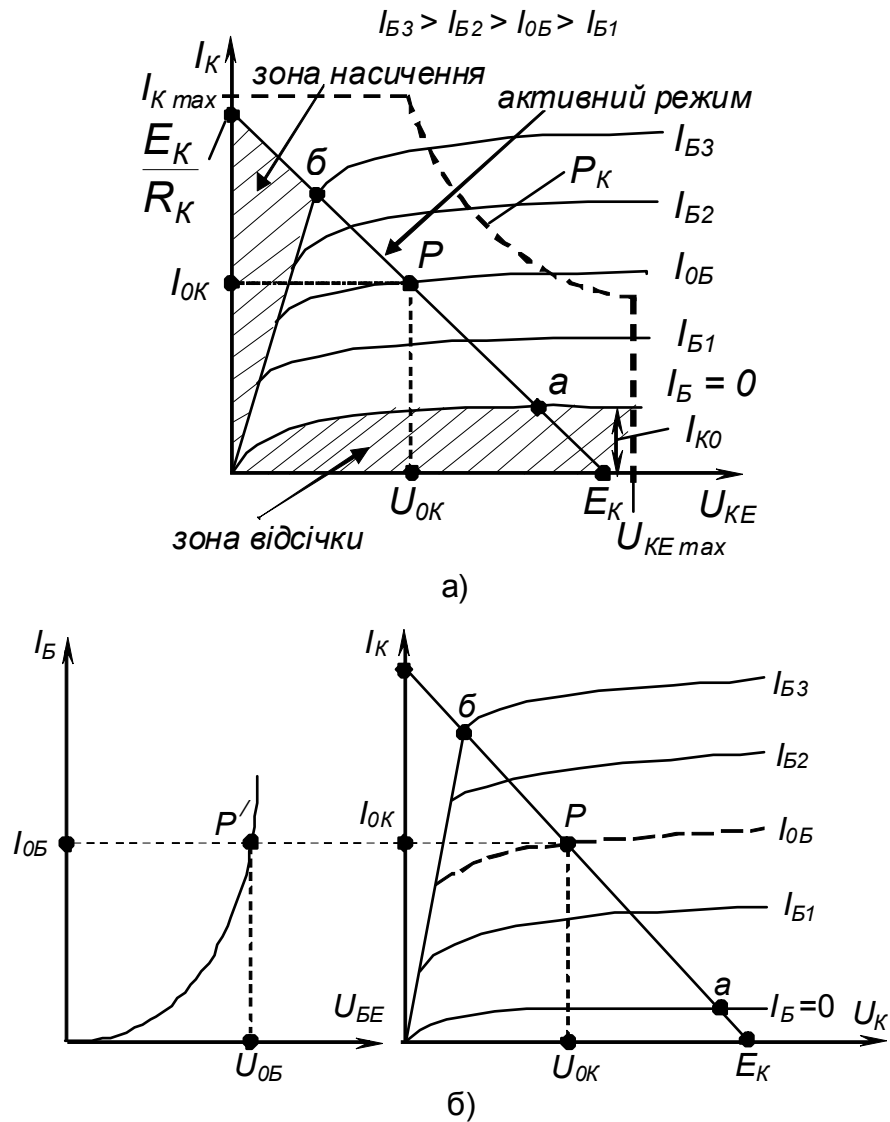


Рисунок 1.8 – Побудова динамічної характеристики транзистора за постійним струмом і режимами роботи транзистора

Польовим називається транзистор, керований електричною напругою – полем (на відміну від біполярних транзисторів, у яких процес керування обов'язково супроводжується протіканням струму у колі керуючого електрода – бази). Розрізняють польові транзистори з керуючим  $p-n$  переходом і з ізольованим затвором.

На рисунку 1.9, а наведено конструкцію польового транзистора з керуючим  $p-n$  переходом.

Цей транзистор являє собою напівпровідникову пластинку з провідністю, наприклад,  $n$ -типу, на верхній і нижній гранях якої створюються шари з провідністю  $p$ -типу. Ці шари електрично з'єднують між собою, утворюючи єдиний електрод, що називається затвором (3).

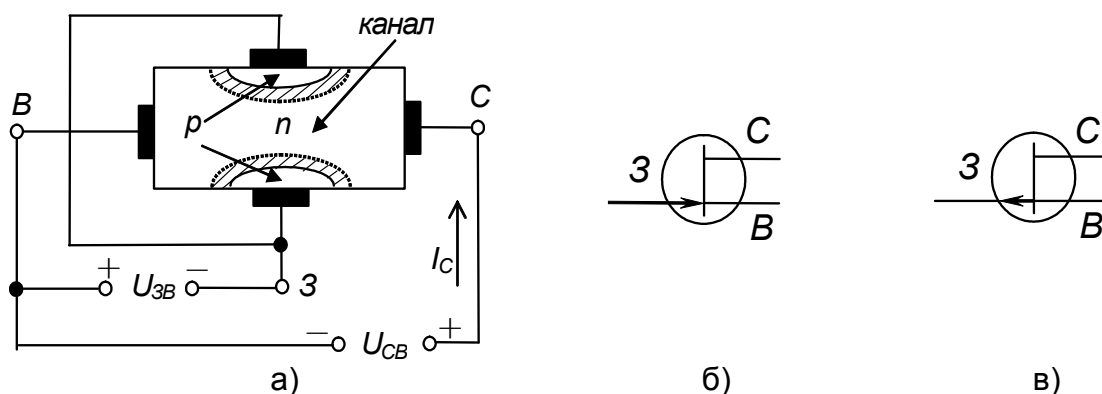


Рисунок 1.9 – Структура та умовне позначення ПТ з керуючим  $p-n$  переходом з каналом  $n$ -типу (а і б) та умовне позначення ПТ з каналом  $p$ -типу (в)

Шар з провідністю  $n$ -типу, що розташований між шарами з провідністю  $p$ -типу, називається каналом.

Електрична ізоляція між каналом і затвором здійснюється за допомогою  $p-n$  переходів, що утворюються на межі напівпровідників з різною провідністю (використовується та властивість зони  $p-n$  переходу, що її опір безкінечний з-за відсутності у ній вільних носіїв заряду).

На торці напівпровідникової пластинки (каналу) наносять омичні контакти, що утворюють два інших електроди, до яких підмикається джерело живлення і навантаження. Контакт, до якого підмикається негативний полюс джерела, називається виток (В), а контакт, до якого підмикається позитивний полюс, стоком (С).

Основні носії заряду (у даному випадку електрони) рухаються від виток до стоку (тече струм) через канал, поперечний переріз якого регулюється негативною відносно виток напругою на затворі  $U_{3B}$ , що зміщує  $p-n$  переходи у зворотному напрямку (розширюючи зони непровідності). Звуження каналу веде до збільшення його опору і зменшення значення струму, що тече через канал.

За напруги між стоком і витком  $U_{CB} = 0$  стінки каналу є екіпотенціальними поверхнями. При деякому  $U_{3B} = U_{3B0}$ , названому напругою відтинання,  $p-n$  переходи змикаються за всією довжиною каналу. У результаті стік і витік виявляються ізольованими один від одного. Значення напруги відтинання залежить від концентрації домішок у каналі і його розмірів.

У робочому режимі ( $U_{CB} > 0$ ) поверхні каналу не є екіпотенціальними, бо струм, що протікає через канал, створює падіння напруги, яка змінює ступінь зворотного зміщення  $p-n$  переходів за довжиною каналу. Біля виток напруга зсуву  $p-n$  переходів дорівнює  $U_{3B}$ , а біля стоку ( $U_{3B} + U_{CB}$ ).

Отже, перетин каналу буде змінним (зменшується від виток до стоку). Опір каналу при цьому носить нелінійний характер, тому і залежність  $I_C = f(U_{CB})$  також буде нелінійною. З підвищенням  $U_{CB}$  напруга на  $p-n$  переходах досягає значення напруги відтинання  $U_{3B0} = (U_{3B} + U_{CB})$  і

вони поблизу стоку майже змикаються. При цьому диференційний опір каналу різко зростає і подальше збільшення напруги  $U_{CB}$  не призводить до збільшення струму  $I_C$  (точка **a** на рис. 1.10). Тобто відбудеться насичення струму стоку (завдяки дії внутрішньої системи автоматичного регулювання з негативним зворотним зв'язком).

Напруга  $U_{CBH} = (U_{3B0} - U_{3B})$  називається напругою насичення. Її значення зі зменшенням напруги  $U_{3B}$  зростає, як видно з стокових (вихідних) ВАХ транзистора, наведених на рисунку 1.10.

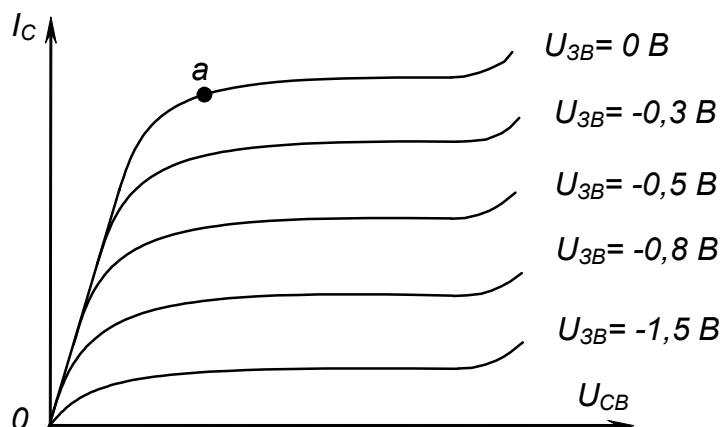


Рисунок 1.10 – Стокові ВАХ ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу

Змінюючи напругу на затворі  $U_{3B}$  за фіксованої напруги  $U_{CB}$ , також можна керувати шириною каналу, а отже, значенням струму  $I_C$ , що видно зі стік-затворних ВАХ транзистора  $I_C = f(U_{3B})$ , наведених на рисунку 1.11.

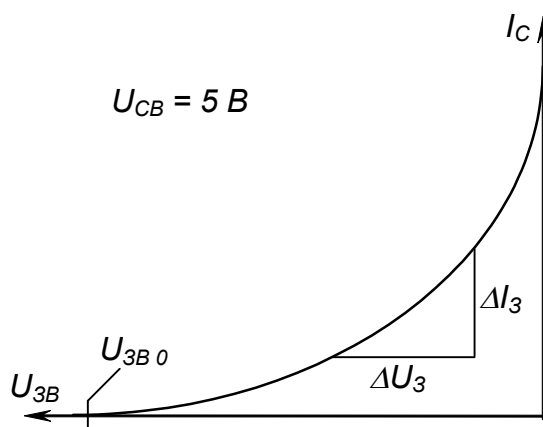
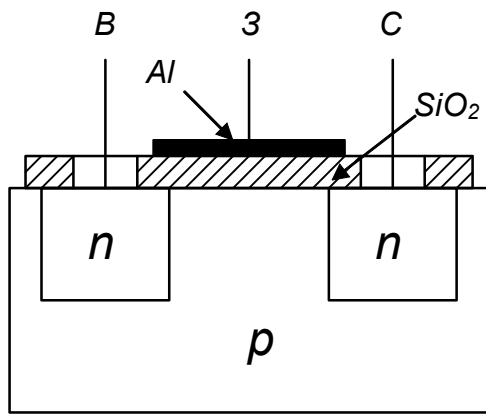


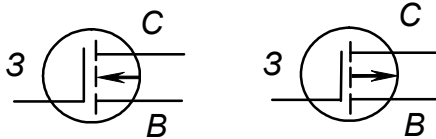
Рисунок 1.11 – Стік-затворна ВАХ ПТ з керуючим  $p$ - $n$  переходом і каналом  $n$ -типу

Більш широко, особливо у складі ІМС, застосовуються польові транзистори з ізольованим затвором, виконані за структурою метал-діелектрик (окисел) - напівпровідник – МДН (МОН)-транзистори.

Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом  $n$ -типу показана на рисунку 1.12, а, а умовне зображення – на рисунку 1.12, б, в.



а)



б)

в)

Рисунок 1.12 – Конструкція МОН-транзистора з індукованим каналом  $n$ -типу (а) і умовні позначення таких транзисторів з каналами  $n$ -типу (б) та  $p$ -типу (в)

При негативній чи рівній нулю напрузі  $U_{3B}$  струм стоку  $I_C$  дорівнює нулю, бо обидва  $p-n$  переходи транзистора ввімкнені зустрічно.

За позитивної напруги  $U_{3B}$  поверхня шару  $p$ -типу на межі напівпровідника і діелектрика збагачується електронами, що притягаються до позитивного електроду з глибини пластинки (знаходяться там за рахунок теплової генерації пар носіїв заряду). Виникає явище інверсії напівпровідника – тонкий шар  $n$ -типу утворюється на поверхні напівпровідника  $p$ -типу.

Таким чином обидві зони  $n$ -типу (витік і стік) виявляються електрично з'єднаними – утворюється наведений полем (індукований) канал, що має підвищену провідність і через який протікає струм.

Важливим параметрами польових транзисторів є крутизна

стокової характеристики  $S$  і опір стоку  $r_C$ , що визначаються за ВАХ:

$$S = \left. \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}} \right|_{U_C = const} ; \quad (1.5)$$

$$r_C = \left. \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C} \right|_{U_{3B} = const} . \quad (1.6)$$

Польові транзистори знаходять широке застосування в пристроях промислової електроніки, що зумовлено їхніми високими входними опорами (до  $10^{14} - 10^{17}$  Ом), малим рівнем шумів та ін.

### Контрольні запитання

1. Пояснить принцип роботи біполярного транзистора. Нарисуйте умовні позначення біполярних транзисторів різного типу.
2. Пояснить принцип дії польового транзистора з керуючим р-п переходом.
3. Пояснить принцип дії польового транзистора з ізолюваним затвором.
4. За заданими викладачем значеннями  $E_K$  і  $R_K$  на сім'ї вихідних характеристик біполярного транзистора побудуйте лінію навантаження за постійним струмом і вкажіть режими роботи транзистора.
5. Пояснить ефект підсилення транзистора.

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Розд. 1; пп. 2.4, 2.5; розд. 3).
2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 24–45, 109–124).
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. (С. 42–73, 89–112).
4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 20–33, 49–63, 71–76).
5. Красько А. С., Скачко К. Г. Промышленная электроника : учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшейшая школа, 1984 – 208 с. (С. 26–51, 108–116).

## Лабораторна робота № 2

# ДОСЛІДЖЕННЯ БАГАТОКАСКАДНИХ ТРАНЗИСТОРНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ ЗМІННОГО СТРУМУ

### 1 Мета роботи

- 1) Вивчення параметрів і характеристик багатокаскадних підсилювачів змінного струму на біполярних транзисторах.
- 2) Дослідження впливу негативних зворотних зв'язків (НЗЗ) і ємності конденсаторів зв'язку на параметри і характеристики підсилювачів.

### 2 Обладнання

- 1) Стенд лабораторний № 2, 4.
- 2) Мультиметр ВР11.
- 3) Генератор сигналів ГЗ-34.
- 4) Осцилограф С1-93 (С1-83).

### 3 Зміст роботи

- 1) Дослідити властивості одиночного підсилюючого каскаду на біполярних транзисторах без НЗЗ і з НЗЗ за змінним струмом.
- 2) Дослідити властивості двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах без НЗЗ і з комбінованим НЗЗ за різних значень ємності конденсаторів зв'язку.

### 4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомитись з робочим місцем, устаткуванням і приладами.
- 4.2 Ввімкнути вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у ліве положення.
- 4.3 Дослідження властивостей одиночного підсилюючого каскаду на біполярних транзисторах
  - 4.3.1 Дослідження одиночного підсилюючого каскаду з СЕ у режимі класу А виконувати за допомогою схеми, зображеної на рисунку 2.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

Задати частоту вхідного сигналу підсилювача рівною 1000 Гц, для чого:

    - 1) підімкнути вихід генератора сигналів ГЗ-34 до входу підсилювача (до клем  $XI$  і  $\perp$ );
    - 2) перемикач  $SA3$  встановити у натиснуте положення – до виходу першого каскаду підсилювача підімкнеться навантаження  $R_5$  (світиться сигнальна лампа  $I$ );

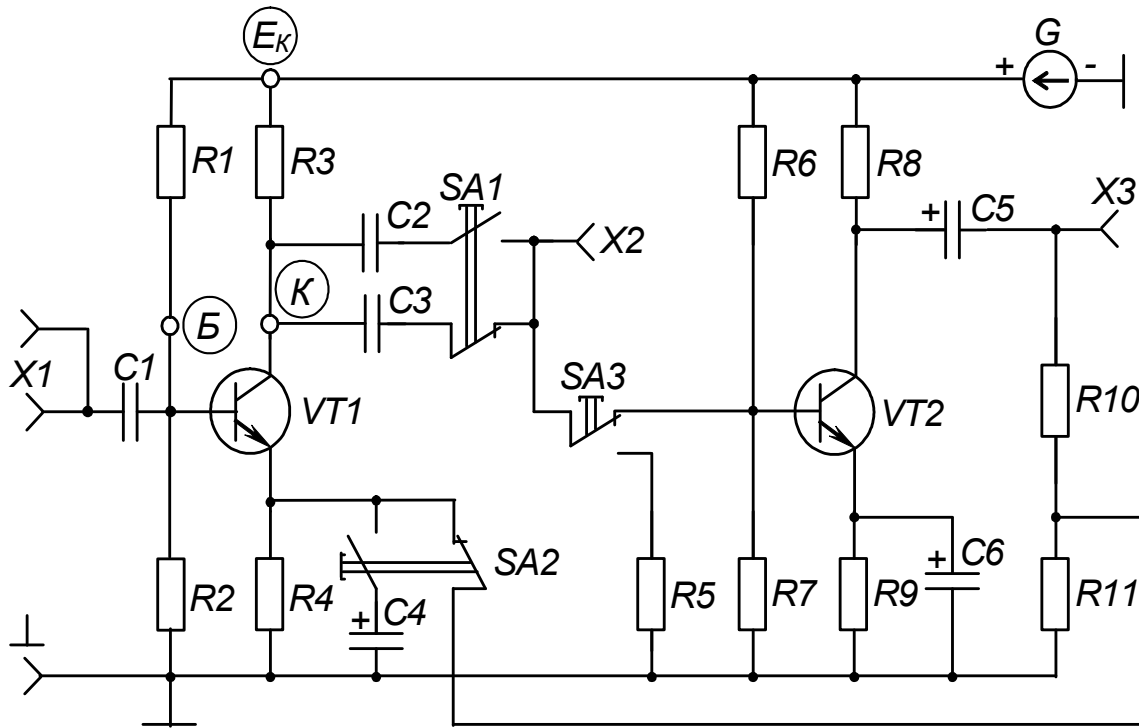


Рисунок 2.1 – Схема для дослідження підсилювачів на біполярних транзисторах

3) перемикач  $SA1$  встановити у ненаτισнуте положення (світиться лампа  $C3$ ), а  $SA2$  – у натиснуте (відключається НЗЗ);

4) встановити межу вимірювання мультиметра « $V\sim$ », «2» і підімкнути його до виходу першого каскаду підсилювача (клеми  $X2$  і  $\perp$ );

5) встановити на світній шкалі генератора сигналів межу « $100\text{ mV}$ ,  $300\text{ mV}$ ,  $1\text{V}$ ,  $0\text{ dB}$ »; перемикач *Пределы шкал. Ослабление* встановити у положення « $ATT.$ »; ручку *Рег. выхода* встановити у граничне ліве положення; перемикач масштабу частоти « $x1$ ,  $x10$ ,  $x100$ » встановити у положення « $x10$ »; на шкалі частоти ручкою плавного регулювання частоти генератора виставити значення « $100$ ».

4.3.2 Зняти амплітудну характеристику  $U_{вих} = f(U_{вх})$  однокаскадного підсилювача без НЗЗ, для чого, обертаючи за годинниковою стрілкою ручку генератора *Рег. выхода*, задавати необхідні значення вхідної напруги підсилювача за вольтметром генератора (переводячи в міру необхідності перемикач світної шкали генератора у наступні положення за годинниковою стрілкою) і фіксувати відповідні значення вихідної напруги підсилювача за мультиметром.

Результати вимірів занести у таблицю 2.1.

4.3.3 Зняти амплітудну характеристику однокаскадного підсилювача з НЗЗ за струмом, для чого перемикач  $SA2$  встановити у ненаτισнуте положення (світиться сигнальна лампа « $OOC$ »).

Далі методика виконання та ж, що й у пп. 4.3.2.

4.3.4 Зняти осцилограми роботи одиночного підсилюючого каскаду за наявності вхідного сигналу і у режимі спокою (без вхідного сигналу).

4.3.5 Задати значення напруги вхідного сигналу підсилювача рівним 100 мВ (відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.2).

Таблиця 2.1 – Результати зняття даних для побудови амплітудної характеристики за  $f_{ex} = 1000$  Гц

$U_{ex}$ , мВ		10	20	40	60	80	100	150	200	250	300	350	400	Вид підсилювача
$U_{вих}$ , В	без НЗЗ													Однокаскадний транзисторний
	з НЗЗ													
	без НЗЗ													Двокаскадний транзисторний
	з НЗЗ													

4.3.6 Підімкнути вимірювальний кабель першого каналу осцилографа до клем  $X1$  і  $\perp$  та зарисувати осцилограму вхідної напруги каскаду  $u_{ex}$ .

4.3.7 Підімкнути вимірювальний кабель другого каналу осцилографа нульовим провідником до клем  $\perp$ . Сигнальний провідник підмикати по черзі до клем  $(B), (K)$  та  $X2$  і, керуючись даними рисунка 1.12, зарисовувати осцилограми напруг на базі та колекторі транзистора  $VТ1$  і на навантаженні каскаду за наявності вхідного сигналу:  $u_B, u_K$  та  $u_{вих}$  відповідно, та за відсутності вхідного сигналу (для чого треба відімкнути генератор від клем  $X1$ ):  $U_{0B}$  та  $U_{0K}$ . Також зарисувати осцилограму напруги на клемі  $(E_K)$ .

Збільшити значення вхідної напруги підсилювача до появи помітних викривлень форми вихідного сигналу. Зарисовувати осцилограми напруг на базі та колекторі транзистора  $VТ1$  і на навантаженні каскаду:  $u_B, u_K$  та  $u_{вих}$ .

При виконанні дослідів органи керування осцилографа встановлювати у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення.

#### 4.4. Дослідження властивостей

двокаскадного підсилювача на біполярних транзисторах

4.4.1 Дослідження виконувати за методикою, викладеною у пп. 4.3.1, тільки перемикач  $SA3$  необхідно встановити у ненатиснуте положення (світиться сигнальна лампа «2»), а мультиметр підімкнути до виходу другого каскаду – клем  $X3$  і  $\perp$ .

4.4.2 Зняти амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача без НЗЗ за методикою пп. 4.3.2.

4.4.3 Зняти амплітудну характеристику двокаскадного підсилювача з комбінованою НЗЗ (за струмом і за напругою) за методикою пп. 4.3.3.

4.4.4 Зняти амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) підсилювача  $U_{вих} = f(U_{вх})$ :

1) без НЗЗ (SA2 у натиснутому положенні) і при ємності конденсатора зв'язку  $C_p = C_2 = 0,5$  мкФ (SA1 у натиснутому положенні);

2) без НЗЗ і при ємності  $C_p = C_3 = 20$  мкФ (SA1 у ненатиснутому положенні);

3) з НЗЗ (SA2 у ненатиснутому положенні) і при  $C_p = C_2 = 0,5$  мкФ (SA1 у натиснутому положенні);

4) з НЗЗ і при  $C_p = C_3 = 20$  мкФ (SA1 у ненатиснутому положенні).

Значення напруги вхідного сигналу підсилювача Ручкою *Reg. вихода* генератора задати рівним 50 мВ (або 70, 100 – на вибір) згідно до методики, викладеної у пп. 4.3.1.

Необхідні значення частоти вхідного сигналу підсилювача задавати ручкою плавного регулювання частоти генератора за шкалою і за допомогою перемикача масштабу частоти «x1, x10, x100».

Результати вимірів занести у таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати зняття даних для побудови АЧХ за  $U_{вх} = \text{const}$

$f_{вх}, \text{Гц}$		50	100	200	500	$10^3$	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$10 \times 10^3$	$15 \times 10^3$	$20 \times 10^3$	Вид підсилювача
$U_{вих}, \text{В}$	без НЗЗ	C2*)										Двокаскадний транзисторний
		C3*)										
	з НЗЗ	C2										
		C3										

4.5 Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного.

Навести порядок на робочому місці.

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиці 2.1 у одній системі координат побудувати графіки амплітудних характеристик. Зробити висновки про характер кривих.

5.2 За амплітудними характеристиками визначити динамічний діапазон і коефіцієнт підсилення за напругою  $K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$  кожного підсилювача. Зробити висновок про вплив НЗЗ на ці параметри.

5.3 Осцилограми роботи однокаскадного підсилюючого каскаду з СЕ у режимі класу А розмістити одну під одною згідно з рисунку 2.4.

5.4 За даними таблиці 2.2 розрахувати значення  $K_U$  і занести у таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Результати розрахунку значень коефіцієнта підсилення для побудови АЧХ

$f_{ex}$ , Гц		50	100	200	500	$10^3$	$2 \times 10^3$	$5 \times 10^3$	$10 \times 10^3$	$15 \times 10^3$	$20 \times 10^3$	Вид підсилювача
$K_U = U_{e_{ux}} / U_{ex}$	без НЗЗ	$C_2^*$										Двокаскадний транзисторний
		$C_3^*$										
	з НЗЗ	C2										
		C3										

5.5 За даними табл. 2.2 побудувати у одній системі координат АЧХ підсилювачів  $K_U = f(\lg f_{ex})$ . Зробити висновки про характер кривих.

5.6 За АЧХ визначити смугу пропускання кожного підсилювача. Зробити висновок про вплив НЗЗ і ємності конденсатора зв'язку на характеристики підсилювача.

## 6 Пояснення до роботи

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для підсилення потужності електричних сигналів без спотворення їхньої форми і частоти (для лінійного підсилювача).

Необхідність у підсилювачі виникає тоді, коли потужність джерела сигналу менша від потужності навантаження. У такому разі послідовно з навантаженням вмикають зовнішнє потужне джерело живлення і підсилюючий елемент. Джерело сигналу діє не безпосередньо на навантаження, а на вхід підсилюючого елемента і, змінюючи провідність останнього, забезпечує пропорційні вхідному сигналу зміни струму у колі навантаження. У результаті в навантаженні виділяється необхідна потужність за рахунок енергії джерела живлення.

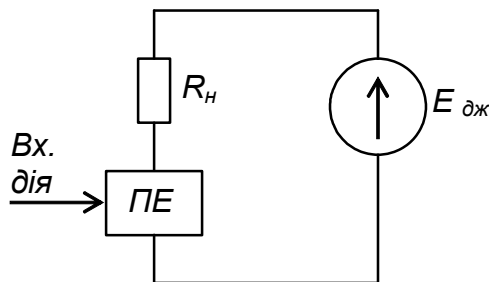


Рисунок 2.2 – Узагальнена схема підсилення

Таким чином, у самому загальному вигляді, для підсилення необхідна схема, наведена на рисунку 2.2.

Вона складається з навантаження  $R_n$ , джерела живлення  $E_{дж}$  та деякого гіпотетичного підсилюючого елемента  $ПЕ$ .

Малопотужна вхідна дія ( $Вх. дія$ ) змінює параметри  $ПЕ$  так, що пропорційно їй змінюється потужність, яка виділяється в  $R_n$  за рахунок  $E_{дж}$ .

Найпростіший вузол, що забезпечує підсилення електричних сигналів, називається підсилюючим каскадом.

Схему одиночного транзисторного підсилюючого каскаду зі спільним емітером (схема з СЕ), що забезпечує підсилення сигналів напруги змінного струму як за напругою, так і за струмом, наведено на рисунку 2.3.

Силowe коло каскаду складають джерело живлення  $E_K$ , резистор колекторного навантаження  $R_K$  і підсилюючий елемент – транзистор  $VT1$ .

Джерело підсилюваного сигналу підмикається до вхідного кола

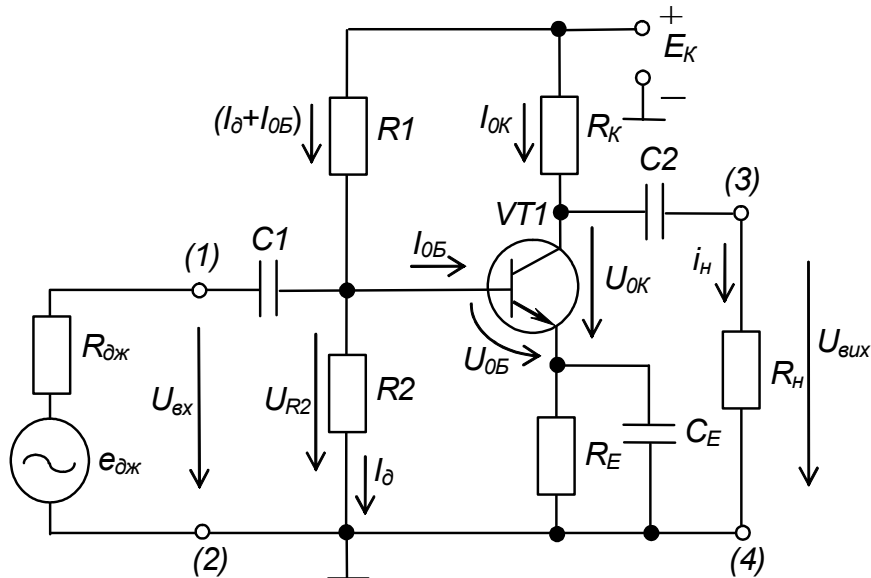


Рисунок 2.3 – Підсилюючий каскад на біполярному транзисторі з СЕ

каскаду через конденсатор  $C_1$  – точки (1) і (2).

Навантаження каскаду у даному випадку таке, що вимагає обов'язкового під'єднання одного з виводів до нульової точки (найчастіше таким навантаженням є наступний підсилюючий каскад). Тому воно підімкнене до виходу каскаду через конденсатор  $C_2$  – точки (3) і (4).

Конденсатори розділяють кола за постійним струмом (постійний струм через конденсатор не протікає) і зв'язують їх за змінним. Вони виключають вплив постійної складової напруги джерела сигналу (якщо вона є) на вхідні кола каскаду і навпаки – напруги постійного струму вхідних кіл каскаду на джерело вхідного сигналу ( $C_1$ ), а також вплив постійної складової вихідної напруги на навантаження ( $C_2$ ).

Напруга на базі транзистора у режимі спокою (за відсутності вхідного сигналу змінної напруги)  $U_{0B}$  визначається дільником напруги  $R_1$ ,  $R_2$  і резистором  $R_E$ . Вона забезпечує струм бази  $I_{0B}$  і відповідно струм колектора  $I_{0K}$  – режим за постійним струмом.

Для забезпечення температурної стабілізації режиму спокою каскаду у коло емітера включають резистор  $R_E$ . Він забезпечує негативний зворотний зв'язок за струмом дія якого полягає у наступному.

Оскільки напруга спокою бази

$$U_{0B} = U_{R2} - I_{0E}R_E, \quad (2.1)$$

де  $U_{R2}$  – напруга на резисторі  $R_2$ ,  
а струм спокою емітера

$$I_{0E} = I_{0K} + I_{0B}, \quad (2.2)$$

то, наприклад, при збільшенні  $I_{0E} \approx \beta I_{0B}$ , за рахунок зростання коефіцієнта підсилення струму транзистора  $\beta$  під впливом зміни температури навколишнього середовища, збільшується  $I_{0E}$ . А значить збільшується і падіння напруги на  $R_E$ . За (2.1) це призводить до зменшення  $U_{0B}$ , що зменшує значення базового струму  $I_{0B}$ . У результаті цього  $I_{0K}$  наближається до попереднього значення.

Для усунення такого ж ефекту за змінним струмом (для виключення негативного зворотного зв'язку за підсилюваним сигналом)  $R_E$  за змінним струмом зашунтовано конденсатором  $C_E$ . Опір цього конденсатора на найнижчій частоті підсилюваного сигналу повинен бути набагато меншим за опір резистора  $R_E$ .

У режимі спокою струми бази і колектора постійні. Напруга спокою на колекторі транзистора

$$U_{0K} = E_K - I_{0K}(R_K + R_E). \quad (2.3)$$

При подачі вхідної змінної напруги на постійну складову струму  $I_{0B}$  накладається змінна складова, і струм бази стає пульсуючим. Відповідно пульсуючими стають струм колектора з амплітудою пульсацій  $I_{Km}$  і колекторна напруга з амплітудою  $U_{Km}$ , як показано на часових діаграмах рисунку 2.4.

Змінна складова колекторної напруги через конденсатор  $C_2$  передається на навантаження. Опір конденсатора  $C_2$  на найнижчій частоті підсилюваного сигналу повинен бути набагато меншим за опори резистора  $R_K$  і навантаження  $R_n$ .

Оскільки вихідний опір каскаду практично дорівнює опору резистора  $R_K$ , то зміни опору навантаження  $R_n$  суттєво впливають на діюче значення вихідної напруги.

З графіка також видно, що, наприклад, зі збільшенням миттєвих значень струму колектора миттєві значення напруги на колекторі зменшуються. При цьому зміни струму колектора пропорційні змінам вхідної напруги, а фаза напруги на колекторі зміщена відносно фази вхідної напруги на  $180^\circ$  – кажуть, що підсилюючий каскад з  $C_E$  інвертує вхідний сигнал.

Найважливішим параметром підсилювача є коефіцієнт підсилення – відношення напруги (струму, потужності) на виході підсилювача до напруги (струму, потужності) на вході (відповідно, коефіцієнт підсилення за напругою  $K_U$ , за струмом  $K_I$ , за потужністю  $K_P$ ). Він показує ступінь збільшення вихідного сигналу у порівнянні з вхідним. У ідеального лінійного підсилювача коефіцієнт підсилення повинен мати постійне значення незалежно від значень напруги і частоти вхідного сигналу.

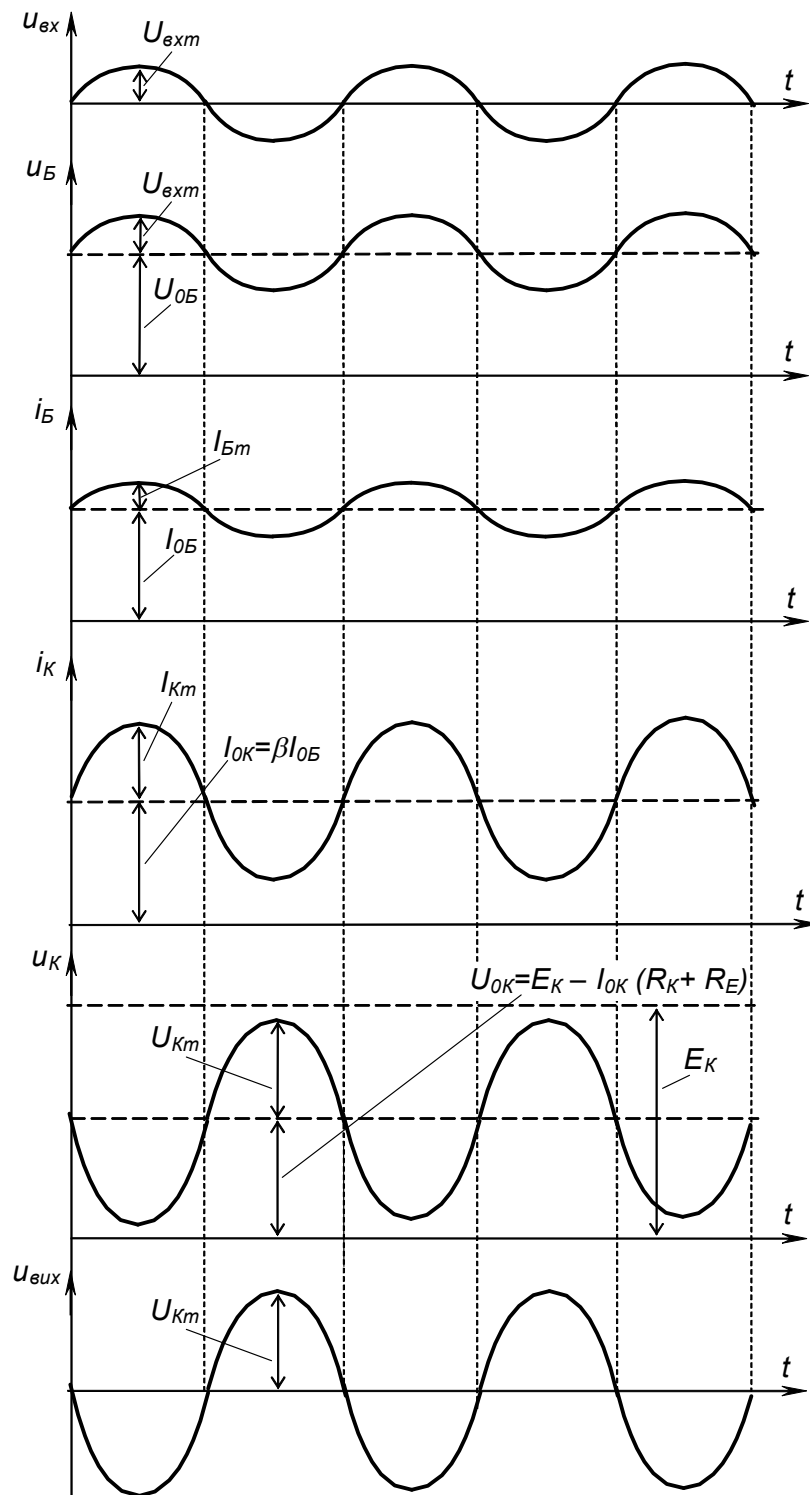


Рисунок 2.4 – Часові діаграми роботи каскаду підсилення з СЕ

Якщо підсилення одного каскаду недостатньо, застосовують багатокаскадні підсилювачі, що являють собою послідовне з'єднання декількох каскадів.

Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення ввімкнених послідовно каскадів.

Основними характеристиками підсилювача є амплітудна й амплітудно-частотна характеристики.

Амплітудна характеристика показує залежність  $U_{вих} = f(U_{вх})$  на деякій постійній частоті.

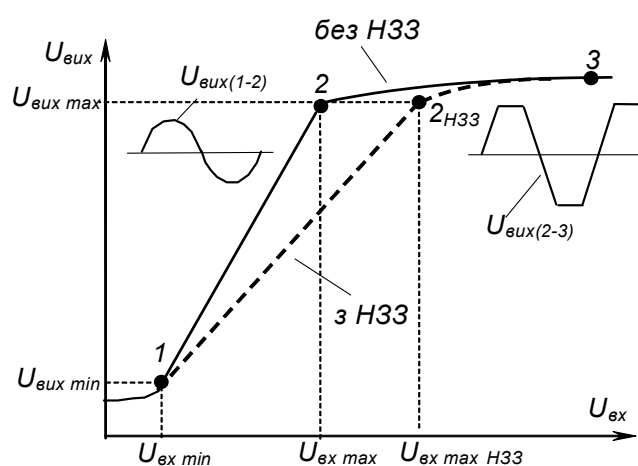


Рисунок 2.5 – Амплітудна характеристика підсилювача  $U_{вих} = f(U_{вх})$

У реального підсилювача ця характеристика має вигляд, наведений на рисунку 2.5.

У робочому діапазоні значень напруги від  $U_{вх min}$  до  $U_{вх max}$  характеристика лінійна.

У зоні від 0 до  $U_{вх min}$  напруга на виході визначається власними шумами підсилювача, викликаними, наприклад, пульсаціями напруги живлення, неоднорідністю структури елементів. Шуми глушать корисний сигнал.

При входніх напругах більших за  $U_{вх max}$  пропорційність між  $U_{вих}$  і  $U_{вх}$  порушується через порушення пропорційної залежності між входнім і вихідним струмами транзистора (транзистор починає заходити у режими насичення та відтинання). При цьому виникають викривлення вихідного сигналу, що називаються нелінійними. Підсилювач входить у режим насичення, коли вихідна напруга не залежить від входньої. Зауважимо, що необхідно розрізняти режими насичення транзистора (за постійним струмом) і режим насичення підсилювача (за змінним струмом).

Здатність підсилювача підсилювати мінімальне і максимальне значення напруги з дотриманням їхньої пропорційної залежності визначається динамічним діапазоном:

$$D = \frac{U_{вх макс}}{U_{вх мин}}. \quad (2.4)$$

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) показує залежність модуля коефіцієнта підсилення підсилювача від частоти. Тобто показує, як підсилюються гармонійні складові складного сигналу. Вид АЧХ наведено на рис. 2.6.

Неоднаковість підсилення гармонійних складових веде до частотних викривлень, через які форма складного вихідного сигналу відрізняється від форми входнього.

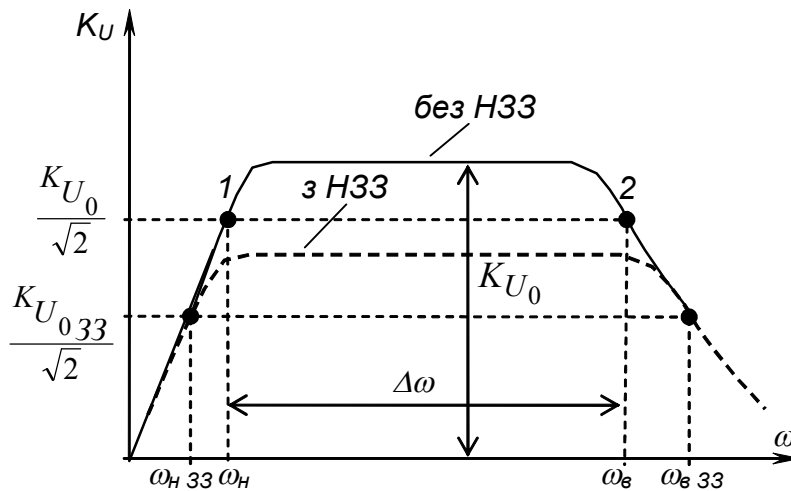


Рисунок 2.6 – АЧХ підсилювача з резистивно-ємнісними зв'язками

Причиною частотних викривлень є елементи підсилювача, опір яких залежить від частоти (ємності, індуктивності). Як зосереджені – елементи схеми (на низьких частотах), так і розосереджені – паразитні (на вищих частотах).

За АЧХ можна визначити смугу пропускання підсилювача

$$\Delta f = f_B - f_H, \quad (2.5)$$

що являє собою діапазон частот, у якому коефіцієнт підсилення не відрізняється від максимального  $K_{U0}$  більш, ніж у  $\sqrt{2}$  раз:

$$K_U \geq \frac{K_{U0}}{\sqrt{2}}. \quad (2.6)$$

Для підсилення сигналів змінного струму застосовують підсилювачі з резистивно-ємнісними міжкаскадними зв'язками. Схему такого двокаскадного підсилювача наведено на рисунку 2.7.

Наявність конденсаторів у якості елементів міжкаскадного зв'язку ( $C_2$ ), а також зв'язку з джерелом сигналу ( $C_1$ ) і навантаженням ( $C_3$ ) робить режими роботи каскадів за постійним струмом взаємозалежними, а також виключає їхній вплив на роботу джерела сигналу і навантаження (див.  $U_{0K}$  на рис. 2.4).

У той же час наявність цих конденсаторів веде до зниження коефіцієнта підсилення на нижчих частотах через те, що опір конденсаторів  $X_C = 1/2\pi fC$  зі зниженням частоти збільшується, а значить зростає падіння напруги на них і, у результаті, менша частка змінної напруги передається у навантаження (або наступний каскад). В області середніх і вищих частот вплив цих конденсаторів незначний.

На вищих частотах паразитні ємності (ємності монтажу і міжелектродні ємності у транзисторах та інших елементах) призводять до шунтування корисного сигналу (замикання частини струму корисного сигналу на загальний провід), а також до виникнення паразитних НЗЗ (наприклад, через ємність колектор-база транзисторів).

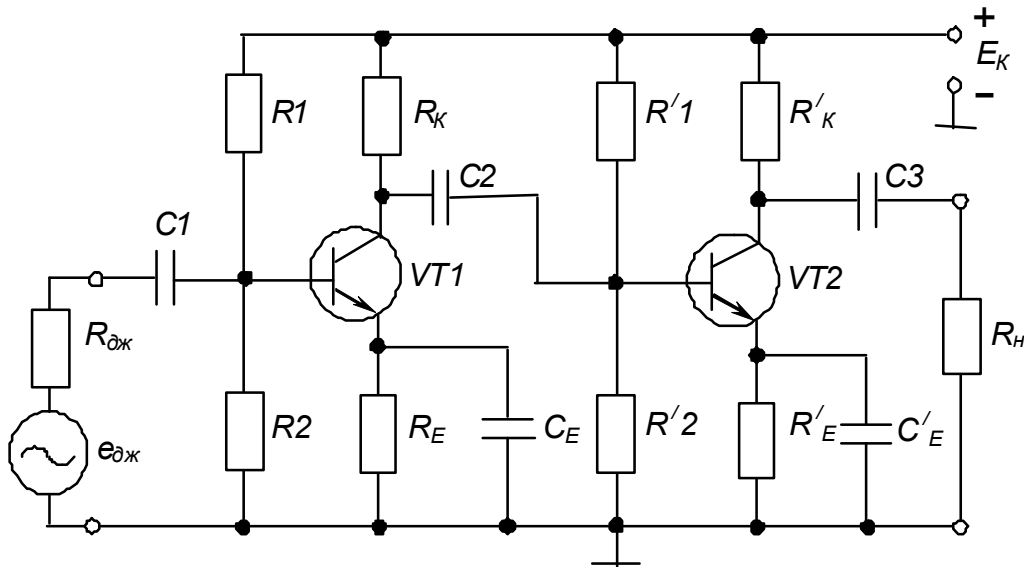


Рисунок 2.7 – Двокаскадний підсилювач з резистивно-ємнісними зв'язками

Все це призводить до зниження коефіцієнта підсилення. Тут також позначається залежність коефіцієнта підсилення транзисторів за струмом  $\beta$  від частоти. Отже необхідно вибирати транзистори з граничною частотою підсилення, що значно перевищує верхню частоту сигналу.

Каскад підсилювача, як правило, має кола, за допомогою яких частина енергії сигналу передається з виходу каскаду на його вхід або на вхід одного з попередніх каскадів – кола зворотного зв'язку.

Ми вже знайомі з НЗЗ за постійним струмом, що застосовується для температурної стабілізації режиму спокою підсилюючого каскаду.

До речі, наявність конденсаторів  $C_3$  і  $C_4$ , що шунтують резистори  $R_4$  і  $R_8$ , на нижчих частотах веде до виникнення НЗЗ за змінним струмом і відповідно до зниження коефіцієнта підсилення.

У роботі досліджується НЗЗ за змінним струмом, що забезпечується відмиканням конденсатора  $C_4$  (див. рис. 2.1), і за напругою – подачею частини вихідної напруги з ділянки  $R_{10}$ ,  $R_{11}$  у коло емітера  $VT1$  у протифазі до вхідної напруги (див. рис. 2.1).

НЗЗ веде до зниження коефіцієнта підсилення підсилювача:

$$K_{U33} = \frac{K_U}{1 + K_U \cdot X}, \quad (2.7)$$

де  $X = U_{33} / U_{вих}$  – коефіцієнт передачі кола НЗЗ, що показує, яка частина вихідної напруги подається на вхід підсилювача.

Введення НЗЗ, знижуючи коефіцієнт підсилення, у той же час збільшує динамічний і частотний діапазони підсилювача (що видно з його амплітудних і амплітудно-частотних характеристик) та покращує інші його параметри. Так, наприклад, у  $(1 + K_U X)$  раз збільшується вхідний і зменшується вихідний опори підсилювача.

При великому значенні  $K_U$  і глибокому НЗЗ, як впливає з (2.7), якщо  $K_U \rightarrow \infty$ ,  $K_{U33}$  наближається до значення  $1/X$ . Тобто він не залежить від фактичного значення  $K_U$  і його змін з коливаннями температури та під дією інших дестабілізуючих факторів. Отже НЗЗ підвищує стабільність роботи підсилювача.

Наявність позитивного зворотного зв'язку (ПЗЗ), коли сигнал зворотного зв'язку знаходиться у фазі з вхідним, навпроти, погіршує характеристики підсилювача. Виникнення паразитних ПЗЗ через загальні кола живлення каскадів, паразитні ємності й індуктивності може також призводити до самозбудження підсилювача, коли він переходить у режим генерації сигналу деякої частоти.

Виконання підсилювачів у вигляді ІМС, поряд із зменшенням габаритів, значно підвищує їхню якість у порівнянні з підсилювачами на дискретних компонентах. Зокрема, це відбувається за рахунок значного зниження паразитних зворотних зв'язків. Інтегральна технологія дозволяє істотно поліпшити якість і надійність електронних підсилювачів шляхом забезпечення при їхньому проектуванні великого запасу параметрів: так званої функціональної надлишковості.

#### *Контрольні запитання*

- 1. Вкажіть області застосування підсилювачів змінного струму, їхні основні параметри й характеристики.*
- 2. Поясніть причину появи нелінійних викривлень.*
- 3. Вкажіть, у яких режимах працює транзистор підсилювача у його режимах, що відповідають різним ділянкам амплітудної характеристики.*
- 4. Поясніть причини виникнення частотних викривлень в області нижчих частот.*
- 5. Поясніть причини виникнення частотних викривлень в області вищих частот.*
- 6. Поясніть, що таке динамічний діапазон і смуга пропускання підсилювача та як впливає НЗЗ на ці параметри.*
- 7. Поясніть призначення конденсаторів міжкаскадного зв'язку і їхній вплив на АЧХ підсилювача.*
- 8. Поясніть, як забезпечується температурна стабілізація режиму спокою досліджуваних підсилюючих каскадів і як впливають елементи температурної стабілізації на АЧХ.*
- 9. Наведіть схему двокаскадного підсилювача низької частоти, поясніть призначення елементів, покажіть шлях протікання струмів (постійних і змінних).*
- 10. Поясніть призначення НЗЗ, що застосовані у досліджуваних підсилювачах.*
- 11. Вкажіть переваги застосування підсилювачів у інтегральному виконанні (у вигляді ІМС).*

## РЕКОМЕНДОВАНИ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Розд. 3).
2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 97–117, 123–128).
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. (С. 87–104, 112–120, 131–136).
4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 49–58, 89–92, 95–98).
5. Красько А. С., Скачко К. Г. Промышленная электроника: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшая школа, 1984 – 208 с. (С. 99–124).

# Лабораторна робота № 3

## ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ І ЇХНІХ ТИПОВИХ ЗАСТОСУВАНЬ

### 1 Мета роботи

- 1) Дослідження властивостей і характеристик операційних підсилювачів (ОП).
- 2) Дослідження типових аналогових пристроїв на ОП.

### 2 Обладнання

- 1) Стенд лабораторний № 1, 3.
- 2) Вольтметр цифровий В7-27.
- 3) Мультиметр ВР-11.
- 4) Осцилограф С1-93 (С1-83).

### 3 Зміст роботи

- 1) Дослідити властивості і передатні характеристики ОП.
- 2) Дослідити будову і роботу типових аналогових пристроїв на ОП: інвертуючого підсилювача, неінвертуючого підсилювача, підсилювача-віднімача, інвертуючого інтегратора, диференціатора.

### 4 Порядок виконання роботи

4.1 Ознайомитись з робочим місцем і приладами.

4.2 Ввімкнути прилади і живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда лабораторного (між мнемосхемами) встановити у праве положення.

4.3 Дослідження властивостей і характеристик ОП

4.3.1 Дослідження властивостей і характеристик ОП робити за допомогою схеми, наведеної на рисунку 3.1 (верхня мнемосхема на правій половині стенда лабораторного).

До клем  $X1$  і  $\perp$  підімкнути цифровий вольтметр у режимі вимірювання напруги постійного струму на межі «-100 mV», а до клем  $X2$  і  $\perp$  – мультиметр у тому ж режимі на межі вимірювання «-20 V».

4.3.2 Зняти передатну характеристику ОП для інвертуючого вмикання,  $U_{вих} = f(U_{вх})$ , для чого перемикач SA1 встановити у натиснуте положення (світиться сигнальна лампа «*Инв. вкл.*»).

Обертаючи ручку резистора  $R_I$  за годинниковою стрілкою з крайнього лівого положення, задавати необхідні значення  $U_{вх}$  за цифровим вольтметром і фіксувати за мультиметром відповідні значення  $U_{вих}$ . Стежити за правильністю полярності подаваної на вхід мультиметра напруги.

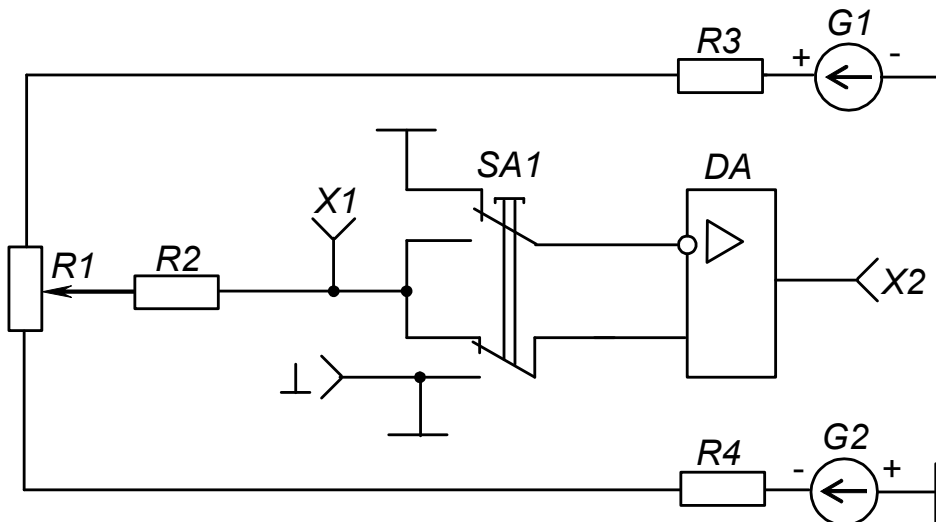


Рисунок 3.1 – Схема для дослідження ОП

Результати вимірів занести в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Результати зняття передатної характеристики ОП

$U_{вх}, мВ$	-50	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	Вмикання ОП
$U_{вих}, В$											інв.
											неінв.

Закінчення таблиці 3.1

$U_{вх}, мВ$	5	10	15	20	25	30	35	40	50	Вмикання ОП	
$U_{вих}, В$											інв.
											неінв.

4.3.3 Зняти передатну характеристику ОП для неінвертуючого вмикання, для чого перемикач *SA1* встановити у ненависнуте положення (світиться сигнальна лампа «Неінв. вкл.»). Далі методика аналогічна наведеній у пп. 4.3.1.1.

#### 4.4 Дослідження типових аналогових пристроїв на ОП

4.4.1 Дослідження пристроїв на ОП виконується за допомогою схеми, наведеної на рисунку 3.2 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

4.4.2 Зібрати схему інвертуючого підсилювача, для чого перемикачі *SA2*, *SA6* і *SA7* встановити у натиснуте положення, а інші у ненависнуте.

Задати цифровому вольтметру режим вимірювання напруги змінного струму на межі « $\sim 100 мВ$ » (вхід « $\sim 300 В$ », вимірювальний кабель екранований) і підкнути його до клем *X2* і  $\perp$ . Зафіксувати результат вимірювання вхідної напруги підсилювача.

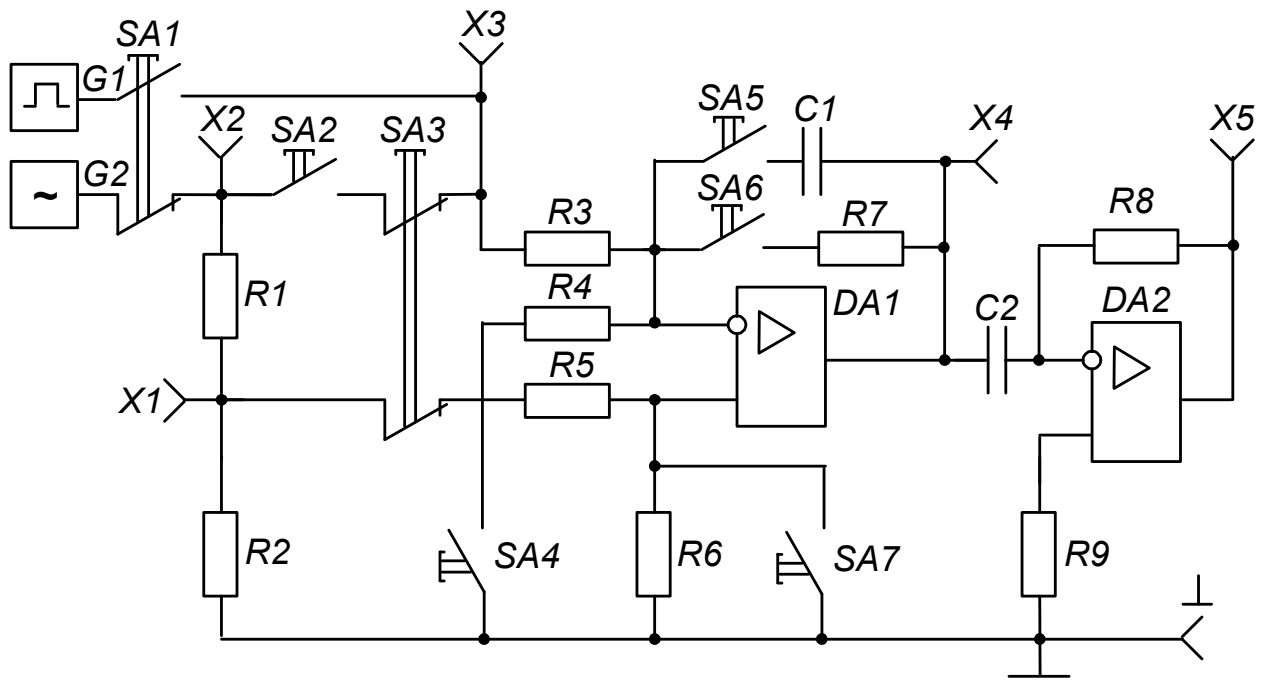


Рисунок 3.2 – Схема для дослідження типових аналогових пристроїв на ОП

Задати межу вимірювання вольтметра « $\sim 10 V$ », підімкнути його до клем  $X4$  і  $\perp$ . Зафіксувати результат вимірювання вихідної напруги підсилювача. Визначити коефіцієнт підсилення за напругою

$$K_U = -\frac{U_{вих}}{U_{вх}}$$

Відімкнути вольтметр від досліджуваної схеми.

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа до клем  $X2$  і  $\perp$ , а другого – до клем  $X4$  і  $\perp$ . Органи керування осцилографа встановити у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення. Зарисувати осцилограми вхідної і вихідної напруг підсилювача (зверніть увагу на те, що вхідна і вихідна напруги інвертуючого підсилювача знаходяться у протифазі).

4.4.3 Зібрати схему неінвертуючого підсилювача, для чого перемикачі  $SA4$  і  $SA6$  встановити у натиснуте положення, а інші – у ненатиснуте.

Далі повторити операції за пп. 4.4.2 (зверніть увагу на те, що вхідна і вихідна напруги неінвертуючого підсилювача синфазні).

4.4.4 Зібрати схему підсилювача-віднімача, для чого перемикачі  $SA2$  і  $SA6$  встановити у натиснуте положення, а інші – у ненатиснуте. Заміряти значення вхідних і вихідних напруг, підмикаючи цифровий вольтметр по черзі до клем:  $X1$  і  $\perp$  –  $U_{вх1}$  (межа вимірювання « $\sim 100 m V$ »);  $X3$  і  $\perp$  –  $U_{вх2}$  (межа вимірювання та ж сама);  $X4$  і  $\perp$  –  $U_{вих}$  (межа вимірювання « $\sim 10 V$ »).

Визначити коефіцієнт передачі підсилювача-віднімача

$$N = -\frac{U_{вих}}{U_{вх2} - U_{вх1}}$$

4.4.5 Зібрати схему інвертуючого інтегратора, для чого перемикачі *SA1*, *SA5* і *SA7* встановити у натиснуте положення, а всі інші – у ненатиснуте.

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа до клем *X3* і  $\perp$ , а другого – до клем *X4* і  $\perp$ .

Зарисувати осцилограми вхідної напруги (за формою близька до прямокутної) і вихідної (пилкоподібна).

Підімкнути кабель другого каналу осцилографа до клем *X5* і  $\perp$  та зарисувати осцилограму вихідної напруги диференціатора, переконавшись, що за формою вона збігається з вхідною напругою інтегратора.

4.5 Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного.

Навести порядок на робочому місці.

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиці 3.1 побудувати передатні характеристики ОП і визначити за ними:

1) граничні значення вихідної напруги:  $U_{вих\max}^+$ ;  $U_{вих\max}^-$ ;

2) напругу зсуву (зміщення) нуля  $U_{з\mu 0}$ ;

3) коефіцієнти підсилення ОП за обома входами: як  $K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$ .

5.2 За осцилограмами зробити висновки про співвідношення фаз вхідної і вихідної напруг інвертуючого і неінвертуючого підсилювачів, інвертуючого інтегратора. Визначити постійну інтегрування інтегратора.

## 6 Пояснення до роботи

ОП – це підсилювачі постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення, що мають диференціальний вхід і один вихід. Виконуються ОП, в основному, у виді інтегральних мікросхем. Свою назву вони отримали завдяки своєму первинному застосуванню: для моделювання математичних операцій в аналогових обчислювальних машинах.

Властивості ОП близькі до властивостей ідеального диференціального підсилювача: симетрія входів, підсилення у широкому діапазоні частот, починаючи від постійного струму, нульова напруга на виході за відсутності сигналу на вході, великий коефіцієнт підсилення (в ідеалі – нескінченний), великий вхідний і малий вихідний опори (в ідеалі – нескінченний і рівний нулю, відповідно), великий динамічний діапазон.

Як показано на типовій схемі вмикання на рисунку 3.3, живлення ОП *DA* здійснюється від двох різнополярних джерел з однаковими абсолютними значеннями е.р.с.  $E_1$  і  $E_2$ . До входів ОП прикладається вхідна напруга  $U_{вх}$  на фоні синфазної  $U_{сф}$ . При цьому ОП підсилює лише  $U_{вх}$ .

При подачі на неінвертуючий вхід нульового потенціалу, підсилювач є інвертуючим – вхідна і вихідна його напруги при цьому мають різні

знаки (у випадку гармонійного сигналу вхідна і вихідна напруги знаходяться у протифазі).

При подачі нульового потенціалу на інвертуючий вхід, підсилювач стає неінвертуючим – знаки вхідної і вихідної напруг співпадають (у випадку гармонійного сигналу – вхідна і вихідна напруги синфазні).

Найважливішими характеристиками ОП є передатні характеристики, що являють собою залежність вихідної напруги ОП від вхідної за кожним із входів при нульовій напрузі на іншому. Ці характеристики представляють у вигляді двох кривих, що відносяться відповідно до інвертуючого і неінвертуючого входів, як показано на рисунку 3.4.

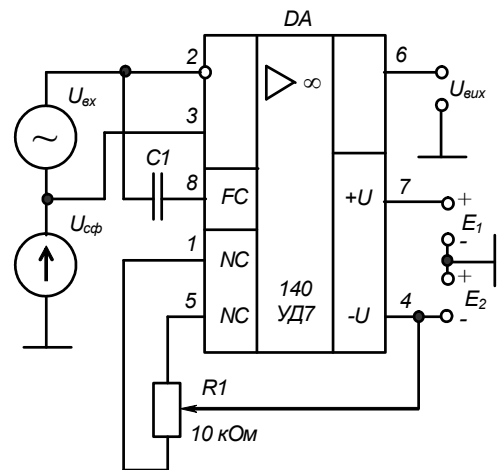


Рисунок 3.3 – Схема вмикання ОП типу 140УД7

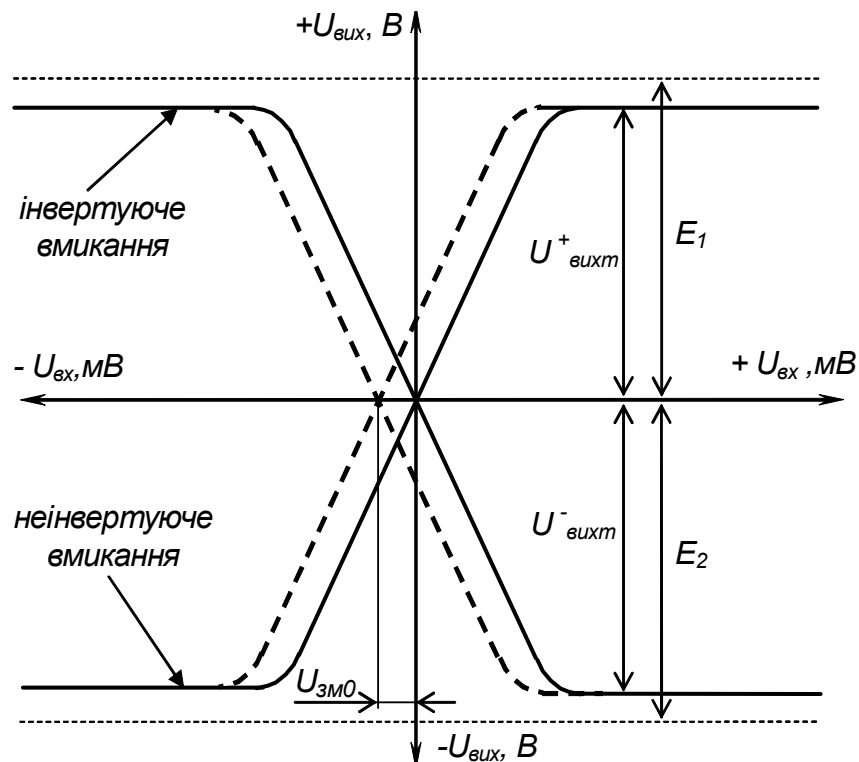


Рисунок 3.4 – Передатні характеристики ОП

За передатною характеристикою можна визначити наступні параметри ОП:

$U_{вих\ max}$  – граничне значення вихідної напруги;

$K_1, K_2$  – коефіцієнти підсилення за входами ОП ( $K_1 \approx K_2 = K_U$ );

$U_{зс0}$  – напруга зсуву (зміщення) нуля.

За однакових значень е.р.с. джерел живлення граничні значення

напруг  $U_{вих}^+$ ,  $U_{вих}^-$  також однакові і близькі до е.р.с. джерел живлення.

$$\text{Коефіцієнт підсилення ОП } K_U = \frac{\Delta U_{вих}}{\Delta U_{вх}}$$

Його значення залежить від типу ОП, і може складати від декількох тисяч до декількох десятків тисяч і більше.

Напруга зсуву нуля  $U_{зм0}$  визначається як напруга, яку необхідно подати на вхід ОП, щоб  $U_{вих} = 0$ .

Іншими важливими параметрами ОП є вхідний опір, вхідні струми зсуву, різниця і дрейф вхідних струмів зсуву, вихідний опір, частотна смуга пропускання ОП та ін.

Розглянемо деякі типові аналогові пристрої, виконані на ОП.

При аналізі роботи цих пристроїв будемо вважати ОП за ідеальний, тобто:

- 1)  $K_U = \infty$  (реально – десятки і сотні тисяч);
- 2)  $R_{вх} = \infty$  за кожним входом (реально – сотні кілоом);
- 3)  $R_{вих} = 0$  (реально – менш за 100 Ом).

При цьому будемо враховувати, що у ідеального ОП, якщо він працює у лінійному режимі (на пологій частині передатної характеристики), потенціали обох входів однакові. Тобто його  $U_{вх} = 0$ .

Дійсно, якщо  $K_U = \infty$ , то за будь-якого значення вихідної напруги  $U_{вих}$ , виявляється, що вхідна напруга  $U_{вх} \Big|_{K_U \rightarrow \infty} = \frac{U_{вих}}{K_U} = 0$ .

Отже, маємо: у лінійному режимі ОП так керує зовнішнім НЗЗ, що напруга між його входами дорівнює нулю.

Реально ця напруга трохи відрізняється від нуля, бо  $K_U$  все ж таки менший за безкінечність. Однак для багатьох застосувань сучасні ОП можна вважати за ідеальні. При цьому похибки, зумовлені неврахуванням реальних параметрів, складають доли відсотка.

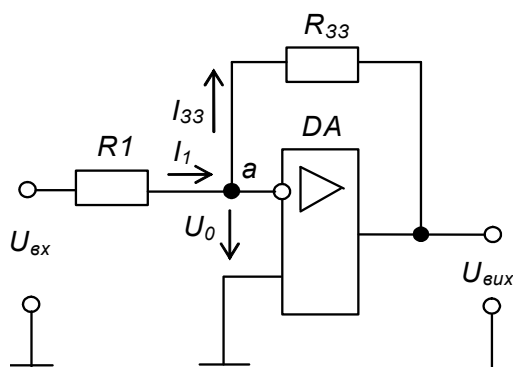


Рисунок 3.5 – Інвертуючий підсилювач на ОП

**Інвертуючий підсилювач**, схему якого наведено на рисунку 3.5 (джерела живлення і корекції тут не показані), змінює знак вихідної напруги відносно вхідної.

У ОП, охопленого НЗЗ, у лінійному (підсилювальному) режимі різницю напруг між входами вважаємо рівною нулю:  $U_0 = 0$ . Виходячи з цього, потенціал інвертуючого входу (точка **а**) дорівнює потенціалу неінвертуючого, підімкненого до нульової точки. Тоді вхідний струм підсилювача становить

$$I_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}. \quad (3.1)$$

Це значить, що джерелом вхідного сигналу цей пристрій сприймається як резистор  $R_1$  – вхідний опір інвертуючого підсилювача дорівнює опоріві резистора  $R_1$ .

Оскільки у ОП  $R_{\text{вх}} = \infty$ , то струм  $I_{\text{вх}}$ , що втікає в точку **a**, витікати з неї може тільки через  $R_{33}$  у вихід ОП і далі в одне з джерел живлення.

$$\text{Отже} \quad I_{\text{вх}} = I_{33}. \quad (3.2)$$

Щоб забезпечити протікання такого струму через  $R_{33}$ , на виході ОП повинна бути напруга

$$-U_{\text{вих}} = I_{33}R_{33}. \quad (3.3)$$

З урахуванням виразів (3.1) – (3.3) знайдемо значення коефіцієнта підсилення інвертуючого підсилювача

$$K_{U_{33}} = \frac{-U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{-I_{33}R_{33}}{I_{\text{вх}}R_1} = -\frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.4)$$

Схему **неінвертуючого підсилювача** наведено на рисунку 3.6.

Виходячи з викладених вище міркувань, при  $U_0 = 0$  напруга, що прикладена до  $R_1$ , дорівнює  $U_{\text{вх}}$ , а через  $R_1$  протікає струм

$$I_{R1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}. \quad (3.5)$$

$$\text{Це значить, що} \quad I_{R1} = I_{33}. \quad (3.6)$$

Отже, щоб забезпечити протікання струму  $I_{33}$  через резистори  $R_1$  і  $R_{33}$ , на виході ОП повинна бути напруга

$$U_{\text{вих}} = I_{33}(R_1 + R_{33}). \quad (3.7)$$

З урахуванням (3.5) – (3.7) коефіцієнт підсилення неінвертуючого підсилювача на ОП

$$K_{U_{33}} = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_{33}(R_1 + R_{33})}{I_{R1}R_1} = \frac{R_1 + R_{33}}{R_1} = \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1}\right). \quad (3.8)$$

Якщо задати  $R_{33} = 0$ , а  $R_1 = \infty$ , то одержимо **повторювач напруги**, схему якого наведено на рисунку 3.7. Він має великий вхідний опір і малий вихідний та використовується для узгодження джерел сигналу, що мають великий опір з низькоомними навантаженнями.

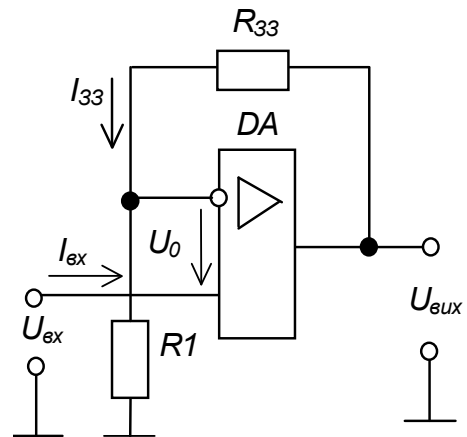


Рисунок 3.6 – Неінвертуючий підсилювач на ОП

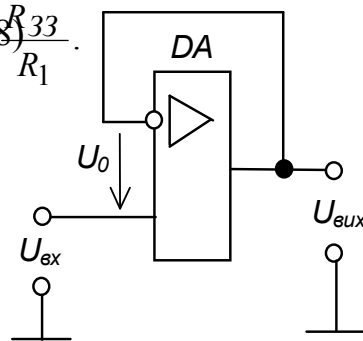


Рисунок 3.7 – Повторювач напруги

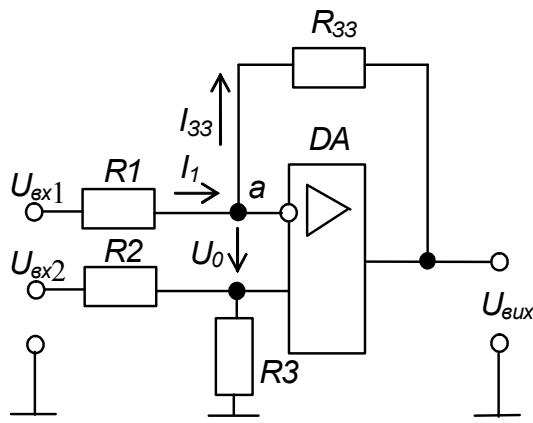


Рисунок 3.8 – Підсилювач-віднімач

Схему підсилювача-віднімача наведено на рисунку 3.8.

Якщо у цій схемі прийняти, що  $U_{вх1} = 0$  (тобто припустимо, що верхній вхід під'єднано до точки  $\perp$ ), схема зводиться до неінвертуючого підсилювача (див. рис. 3.6), на вхід якого сигнал  $U'_{вх2}$  подається через дільник  $R_2, R_3$ .

$$\text{Тоді } U'_{вх2} = U_{вх2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.9)$$

З урахуванням (3.8) одержимо

$$U'_{вих} = U_{вх2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1}\right). \quad (3.10)$$

Якщо тепер прийняти  $U_{вх2} = 0$  (до точки  $\perp$  під'єднано нижній вхід підсилювача), то схема зводиться до інвертуючого підсилювача (див. рис. 3.5). Наявність резисторів  $R_2$  і  $R_3$  не впливає на нульовий потенціал неінвертуючого входу ОП (маємо вхід, підімкнений до нульової точки через провідник з опором  $R_3 / (R_2 + R_3)$ ).

$$\text{Тоді відповідно до (3.4)} \quad U''_{вих} = -U_{вх1} \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.11)$$

За одночасної дії обох вхідних сигналів

$$U_{вих} = U'_{вих} + U''_{вих} = U_{вх2} \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \left(1 + \frac{R_{33}}{R_1}\right) - U_{вх1} \frac{R_{33}}{R_1}. \quad (3.12)$$

$$\text{Якщо задати } R_1 = R_2 = R; \quad (3.13)$$

$$R_{33} = R_3 = NR, \quad (3.14)$$

$$\text{отримаємо } U_{вих} = N(U_{вх2} - U_{вх1}). \quad (3.15)$$

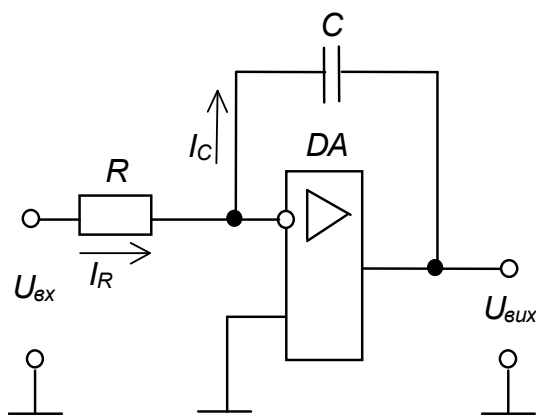


Рисунок 3.9 – Інвертуючий інтегратор

Схему інвертуючого інтегратора на ОП наведено на рисунку 3.9.

Як видно, вона відрізняється від схеми інвертуючого підсилювача, (див. рис. 3.5) тим, що замість  $R_{33}$  ввімкнено конденсатор  $C$ .

Згідно з (3.1) і (3.2)

$$i_R = \frac{U_{вх}}{R}; \quad (3.16)$$

$$i_C = i_R. \quad (3.17)$$

Оскільки конденсатор ввімкнено між виходом ОП і точкою **a**, що має нульовий потенціал, то

$$U_{вих} = -U_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt = \frac{1}{C} \int i_C dt = -\frac{1}{RC} \int U_{вх} dt, \quad (3.18)$$

де  $\frac{1}{RC}$  – постійна інтегрування.

Якщо до входу пристрою прикласти постійну напругу, то

$$i_R = i_C = \frac{U_{вх}}{R} = const. \quad (3.19)$$

Тобто конденсатор заряджається струмом постійного значення, і напруга на ньому змінюється лінійно:

$$U_{вих} = -\frac{1}{RC} U_{вх} \cdot t. \quad (3.20)$$

Це є рівняння прямої, що починається з нуля.

Отже у даному разі на виході інтегратора маємо напругу, що лінійно змінюється. Така його властивість використовується при побудові генераторів пилкоподібної напруги.

Схему **диференціатора** наведено на рисунку 3.10.

Відомо, що

$$i_C = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.21)$$

Оскільки

$$i_C = i_{33} = -\frac{U_{вих}}{R},$$

то 
$$i_C = C \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.22)$$

Тоді 
$$U_{вих} = -RC \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (3.23)$$

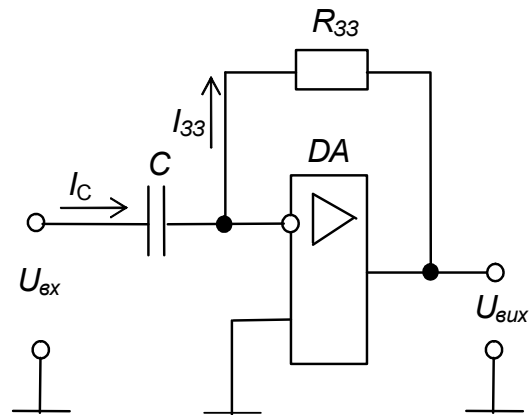


Рисунок 3.10 – Диференціатор

Якщо вхідна напруга диференціатора змінюється лінійно  $\left( \frac{dU_{вх}}{dt} = const \right)$ , то згідно з (3.23) вихідна напруга матиме постійне значення.

На закінчення зазначимо, що, при роботі підсилювачів на ОП у лінійному режимі і за наявності глибокого НЗЗ, ОП за своїми параметрами істотно наближається до ідеального, бо різко зростає його вхідний опір і зменшується вихідний.

Перше, наприклад, пояснюється тим, що через малу різницю потенціалів між входами ( $U_0 \rightarrow 0$ ) незначні і вхідні струми.

З іншого боку, з теорії зворотних зв'язків відомо, що якщо коефіцієнт зворотного зв'язку

$$\chi = \frac{U_{33}}{U_{вих}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{33}}, \quad (3.24)$$

то  $R_{вх33} = R_{вх}(1 + K_U \chi), \quad (3.25)$

$$R_{вих33} = \frac{R_{вих}}{(1 + K_U)}, \quad (3.26)$$

де  $R_{вх33}$  і  $R_{вих33}$  – вхідний і вихідний опори підсилювача, охопленого НЗЗ.

Розглянуті схеми на ОП є основою для побудови найрізноманітніших пристроїв аналогової техніки: підсилювачів, суматорів, активних фільтрів, генераторів і т.п.

#### *Контрольні запитання*

- 1. Поясніть будову ОП і вкажіть їхні властивості.*
- 2. Поясніть вид передатних характеристик ОП для різних схем вмикання та як за ними визначити коефіцієнт підсилення ОП і напругу зсуву нуля.*
- 3. Поясніть принцип дії інвертуючого підсилювача на ОП.*
- 4. Поясніть принцип дії неінвертуючого підсилювача, на ОП.*
- 5. Поясніть принцип дії підсилювача-віднімача на ОП.*
- 6. Поясніть принцип дії інвертуючого інтегратора на ОП.*
- 7. Поясніть принцип дії диференціатора на ОП.*
- 8. Як побудувати суматор на ОП?*
- 9. Поясніть, за рахунок чого властивості пристроїв, побудованих на ідеальному ОП, визначаються тільки параметрами елементів зворотного зв'язку?*

## РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Розд. 4).
2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 146–150, 154–173).
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. (С. 142–160).
4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 65–71, 76–88).
5. Красько А. С., Скачко К. Г. Промышленная электроника: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшая школа, 1984 – 208 с. (С. 127–132).

**Лабораторна робота № 4**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ ПРИСТРОЇВ**  
**НА ДИСКРЕТНИХ ЕЛЕМЕНТАХ І ІНТЕГРАЛЬНИХ**  
**МІКРОСХЕМАХ (ІМС)**

**1 Мета роботи**

- 1) Дослідження мультівібратора на біполярних транзисторах.
- 2) Дослідження тригерів на ІМС.

**2 Обладнання**

- 1) Стенд лабораторний № 2, 4.
- 2) Мультиметр ВР11.
- 3) Осцилограф С1-93 (С1-83).

**3 Зміст роботи**

- 1) Дослідити роботу симетричного мультівібратора на біполярних транзисторах.
- 2) Дослідити роботу мультівібратора з відтинаючими діодами.
- 3) Дослідити роботу тригерів на ІМС:  $RS$ ,  $T$ ,  $D$  і  $JK$ .

**4 Порядок виконання роботи**

4.1 Ознайомитись з робочим місцем, устаткуванням і приладами.

4.2 Ввімкнути вимірювальні прилади та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у праве положення.

4.3 Дослідження роботи симетричного мультівібратора на біполярних транзисторах

4.3.1 Дослідження мультівібраторів виконувати за допомогою схеми, зображеної на рис. 4.1 (верхня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

Перемикачі  $SA1$ ,  $SA2$  встановити у натиснуте положення.

4.3.2 Замалювати осцилограми напруг у контрольних точках симетричного мультівібратора.

Для цього, встановлюючи органи керування осцилографа у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення:

- 1) ручку резистора  $R_1$  встановити у крайнє праве положення;

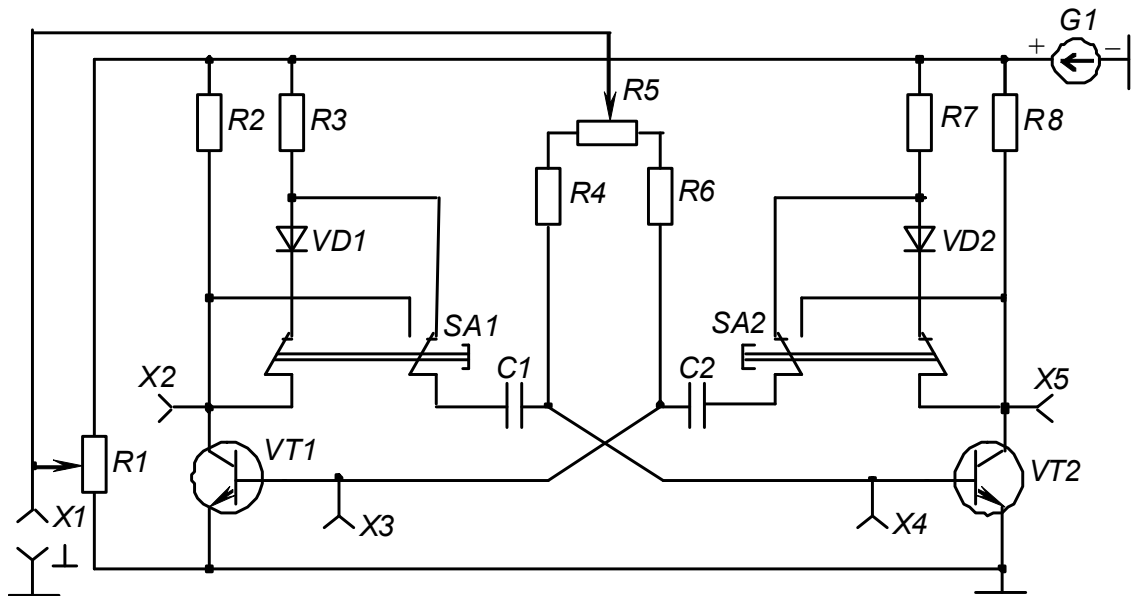


Рис. 4.1 – Схема для дослідження мультивібратора

2) кабель першого каналу осцилографа підключити до клем  $X2$  і  $\perp$ , а другого – до клем  $X3$  і  $\perp$  (сигнальним і нульовим привідниками відповідно);

3) обертанням ручки резистора  $R_5$  установити тривалість імпульсу мультивібратора рівною тривалості паузи між імпульсами.

Замалювати осцилограми напруг у контрольних точках  $X2$  (на колекторі  $VT1$ ) і  $X3$  (на базі  $VT1$ ).

Сигнальний провідник кабелю другого каналу осцилографа перенести на клему  $X5$  і замалювати осцилограму напруги (на колекторі  $VT2$ ), орієнтуючи її відносно перших двох.

Сигнальний кінець кабелю другого каналу перенести на клему  $X4$  і замалювати осцилограму напруги (на базі  $VT2$ ), орієнтуючи її відносно інших осцилограм.

4.3.3 Для середнього положення ручки резистора  $R_5$  за допомогою осцилографа визначити:

1) активну тривалість імпульсу мультивібратора  $t_i$  на рівні 0,5 його амплітуди;

2) тривалість паузи між імпульсами  $t_n$  на рівні 0,5 амплітуди імпульсів;

3) тривалість періоду надходження імпульсів  $T$ ;

4) активну тривалість фронту імпульсу  $t_\phi$  як час зміни напруги від рівня 0,1 до рівня 0,9 амплітуди імпульсу;

5) активну тривалість зрізу (заднього фронту) імпульсу  $t_{зр}$  як час зміни напруги від 0,9 до 0,1 амплітуди імпульсу.

Результати експериментів занести у таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Результати вимірів та розрахунків параметрів імпульсів

Тип мультівібратора	$t_i$ , мс	$t_n$ , мс	$T$ , мс	$t_{\phi}$ , мс	$t_{зр}$ , мс	$f$ , Гц	$Q$	Положення ручки резистора $R_5$
Симетричний								середнє

#### 4.5 Дослідження роботи тригерів на ІМС

4.5.1 Дослідження тригерів виконувати за допомогою схеми, зображеної на рисунку 4.2 (нижня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

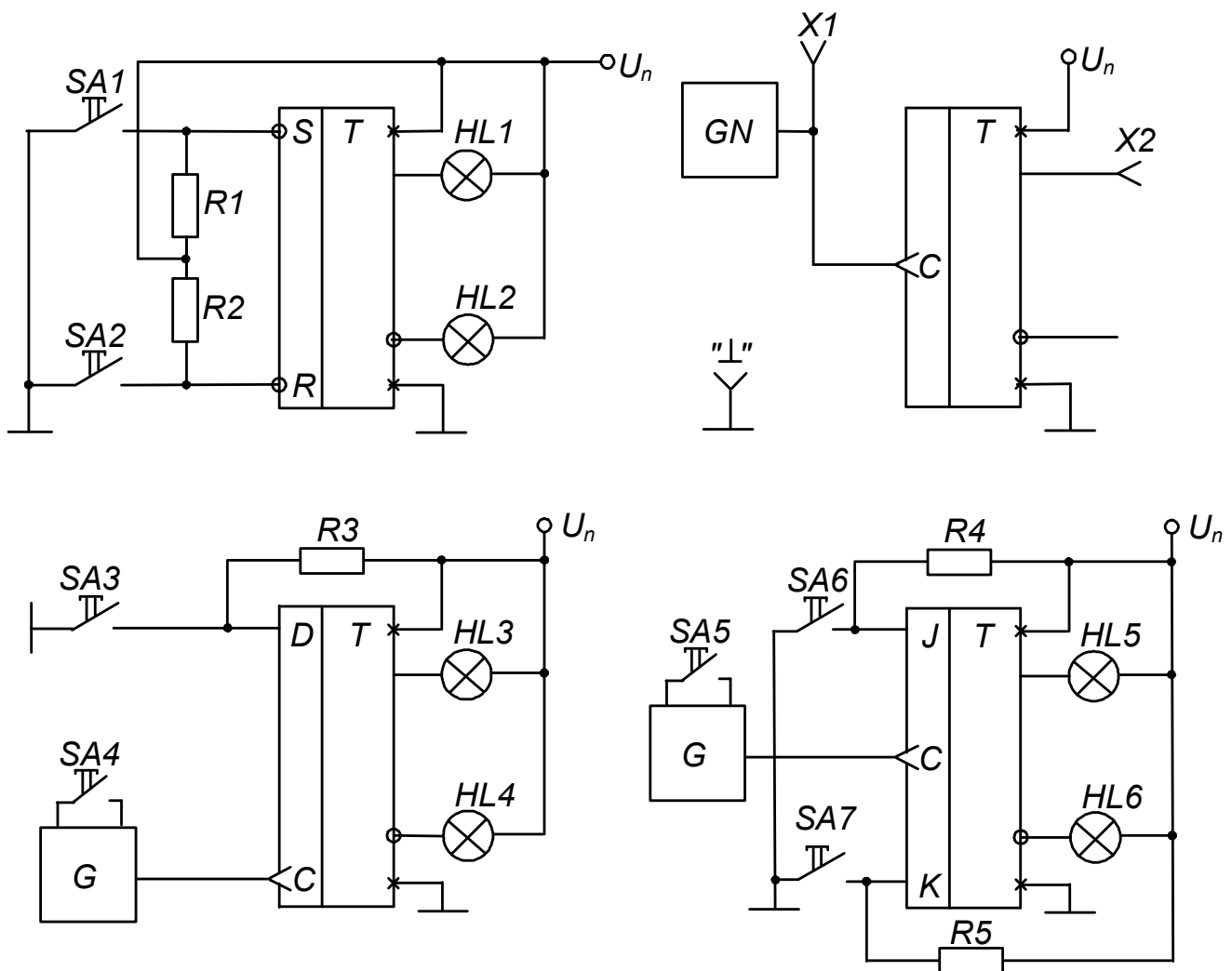


Рисунок 4.2 – Схема для дослідження тригерів

4.5.2 Дослідіть роботу  $RS$ -тригера з інверсними входами і складіть його таблицю переходів.

Для цього за допомогою перемикачів  $SA1$  і  $SA2$  треба задавати необхідні комбінації нулів і одиниць на входах тригера  $S$  і  $R$ . При цьому ненаτισнуте положення перемикача відповідає одиничному сигналу (на

вхід тригера через резистор  $R_1$  або  $R_2$  подається напруга живлення  $U_n$ , світиться сигнальна лампа біля відповідного входу). Натиснуте положення перемикача відповідає нульовому сигналу (на вхід подається напруга, що дорівнює нулю: вхід підмикається до нульового проводу, сигнальна лампа біля входу не світиться). Реакція тригера визначається за світінням ламп:  $HL1$  – одиничний стан і  $HL2$  – нульовий стан.

Результати експерименту занесіть у таблицю 4.3, де позначення  $t^i$  і  $t^{i+1}$  відповідають моментам часу до і після спрацювання тригера.

Зверніть увагу, що спрацювання тригера відбувається одразу після набору відповідної комбінації сигналів на інформаційних входах (маємо асинхронний тригер).

Таблиця 4.3 – Таблиця переходів RS-тригера

$t^i$		$t^{i+1}$
$S^i$	$R^i$	$Q^{i+1}$
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

4.5.3 Дослідіть роботу T-тригера і складіть його таблицю переходів.

Кабель першого каналу осцилографа підімкнути до виходу тактового генератора – до клем  $X1$  та  $\perp$ , а кабель другого каналу до прямого виходу тригера – до клем  $X2$  та  $\perp$ . Органи керування осцилографа встановити у положення, що забезпечують спостереження стійкого зображення.

Замалювати осцилограми вхідної і вихідної напруг тригера. На основі аналізу їхнього вигляду заповніть таблицю 4.4.

Таблиця 4.4 – Таблиця переходів T-тригера

$t^i$	$t^{i+1}$
$C^i$	$Q^{i+1}$
0	
1	

4.5.4 Дослідіть роботу D-тригера і складіть його таблицю переходів.

Для цього за допомогою перемикача  $SA3$  задавати необхідні значення сигналу на вході  $D$  (аналогічно пп. 4.5.2).

На вхід синхронізації  $C$  сигнали генератора  $G$  подавати встановленням перемикача  $SA4$  у натиснуте положення.

Реакцію тригера визначати за світінням ламп:  $HL3$  – одиничний стан,  $HL 4$  – нульовий стан.

Результати експерименту занесіть у таблицю 4.5.

Зверніть увагу на те, що при відповідному сигналі на інформаційному вході  $D$ -тригер змінює стан тільки після надходження імпульсу на його вхід синхронізації  $C$  (маємо синхронний тригер).

Таблиця 4.5 – Таблиця переходів D-тригера

$t^i$	$t^{i+1}$
$D^i$	$Q^{i+1}$
0	
1	

4.5.5 Дослідіть роботу JK-тригера і складіть його таблицю переходів.

Значення вхідних сигналів задавати перемикачами  $SA6$  і  $SA7$  (аналогічно пп. 4.5.2). Сигнали тактового генератора  $G$  подавати на вхід

Таблиця 4.6 – Таблиця переходів JK-тригера

$t^i$		$t^{i+1}$
$J^i$	$K^i$	$Q^{i+1}$
0	0	
0	1	
1	0	
1	1	

синхронізації тригера установкою перемикача SA5 у натиснений стан. Реакцію тригера визначити за світінням ламп HL 5 (одиничний стан) і HL 6 (нульовий стан).

Результати експерименту занесіть в таблицю 4.6.

Зверніть увагу на те, що цей тригер синхронний, а також на те, що при одиничних сигналах на обох інформаційних входах він веде себе як T-тригер.

4.6 Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного. Навести порядок на робочому місці.

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 За осцилограмами напруг у контрольних точках симетричного мультівібратора (пп. 4.3.2) зробити висновок про співвідношення фаз напруг на колекторах транзисторів.

5.2 За даними табл. 4.1 розрахувати значення частоти надходження імпульсів

$$f = 1/T$$

та щільність імпульсів

$$Q = T/t_i$$

симетричного мультівібратора.

Результати розрахунку занести у табл. 4.1.

5.3 На основі аналізу таблиць переходів RS-, D- та JK-тригерів зробити висновки про їхні специфічні властивості.

5.4 За осцилограмами напруг T-тригера (пп. 4.5.3) визначити частоти надходження імпульсів на вході і виході тригера.

Зробити висновок про співвідношення цих частот.

Визначити, при якій зміні сигналу на вході (0–1 чи 1–0) тригер змінює свій стан.

## 6 Пояснення до роботи

6.1 Імпульсні системи та параметри імпульсів і їхньої послідовності

На відміну від аналогових систем, де сигнали змінюються безперервно у часі, в імпульсних системах використовуються сигнали імпульсної форми (напруга, струм).

Імпульсні системи мають більш високі показники к.к.д., точності і завадостійкості. Більш простими є апаратні засоби подання й обробки імпульсної інформації.

Імпульсом називається короткочасна зміна напруги (струму) в електричному колі від нуля до деякого значення, тривалість якої сумірна або менша за тривалість перехідних процесів у цьому колі.

Найчастіше в електронній техніці застосовують імпульси прямокутної форми. Вид реального прямокутного імпульсу позитивної полярності зображено на рисунку 4.3.

Параметри прямокутного імпульсу:

1) амплітуда імпульсу  $U_i$  визначає найбільше значення напруги імпульсного сигналу;

2) тривалість імпульсу  $t_i$ , залежно від значення напруги, на яке реагує імпульсний пристрій, вимірюють на рівні 0,1 або 0,5  $U_i$  (останнє відповідає активній тривалості, бо характеризує енергетичну дію імпульсу);

3) тривалості фронту  $t_\phi$  та зрізу (заднього фронту)  $t_{зр}$  характеризують час зростання і спаду імпульсу (активні тривалості відлічуються, як час зміни напруги між рівнями 0,1 і 0,9  $U_i$ );

4) нерівномірність вершини імпульсу  $\Delta U$ .

Відхилення форми імпульсу від ідеально прямокутної виникають внаслідок впливу паразитних ємностей та індуктивностей, частотних властивостей підсилюючих елементів, а також визначаються будовою генеруючих і підсилюючих пристроїв.

Параметри послідовності імпульсів, зображеної на рисунку 4.4:

1) період надходження імпульсів  $T$  – інтервал часу між однаковими точками двох сусідніх імпульсів;

2) частота повторення (надходження) імпульсів

$$f = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

3) тривалість паузи  $t_n$  – інтервал часу між закінченням одного і початком наступного імпульсу;

4) щільність імпульсів

$$Q = \frac{T}{t_i} \quad (4.2)$$

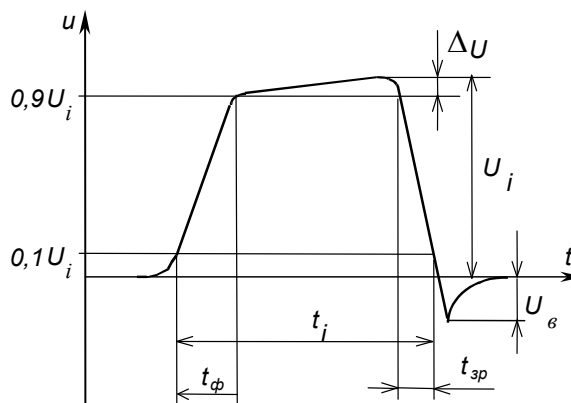


Рисунок 4.3 – Параметри несиметричного імпульсу

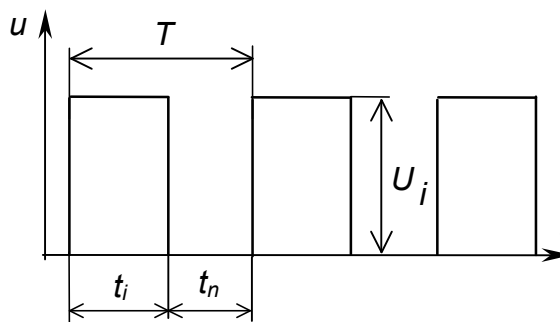


Рисунок 4.4 – Параметри послідовності імпульсів

## 6.2 Симетричний мультивібратор на біполярних транзисторах

Мультивібратори – це релаксаційні автогенератори напруги прямокутної форми (релаксаційний – такий, що різко відрізняється від гармонійного – синусоїдного; автогенератор – пристрій, що генерує незатухаючі коливання без запуску ззовні і не має стійких станів).

Найчастіше мультивібратори працюють у автоколивальному режимі, коли мультивібратор має два нестійких (квазісталіх) стани рівноваги і переходить з одного стану в інший самочинно під впливом внутрішніх перехідних процесів. У такому режимі мультивібратор використовується як генератор прямокутної напруги.

У чекаючому режимі мультивібратор має один сталий і один квазісталий стани рівноваги. Зазвичай він знаходиться у сталому стані і переходить до квазісталого під дією зовнішнього електричного сигналу. Час перебування у квазісталому стані визначається внутрішніми процесами в схемі мультивібратора. Такі мультивібратори використовуються для формування імпульсів напруги необхідної тривалості, а також для затримки імпульсів на визначений час.

У режимі синхронізації використовується мультивібратор, що працює в автоколивальному режимі, але його перехід із одного стану в інший забезпечується зовнішньою синхронізуючою напругою. Для його нормальної

нормальної роботи у цьому режимі необхідно, щоб частота синхронізуючого сигналу перевищувала частоту власних коливань. В результаті частота коливань мультивібратора практично не залежить від дестабілізуючих факторів. Використовуються такі мультивібратори для створення генераторів стабільної частоти і при керуванні складними електронними пристроями, робота яких синхронізована якоюсь зовнішньою дією.

Мультивібратори можуть бути виконані на транзисторах, операційних підсилювачах і цифрових елементах.

Симетричний мультивібратор являє собою релаксаційний автогенератор напруги прямокутної форми, що генерує незатухаючі коливання без запуску ззовні.

На рисунку 4.5 зображено схему мультивібратора на біполярних транзисторах, який виконано за симетричною схемою з колекторно-базовими зв'язками.

Мультивібратор складається з двох каскадів підсилення з СЕ (наприклад,  $V_{T1}$ ,  $R_{K1}$ ,  $R_{B1}$ ).

Для забезпечення позитивного зворотного зв'язку, що за його рахунок мультивібратор самозбуджується, вихідна напруга кожного з каскадів подається на вхід іншого.

Симетричність означає ідентичність параметрів симетрично розташованих елементів схеми.

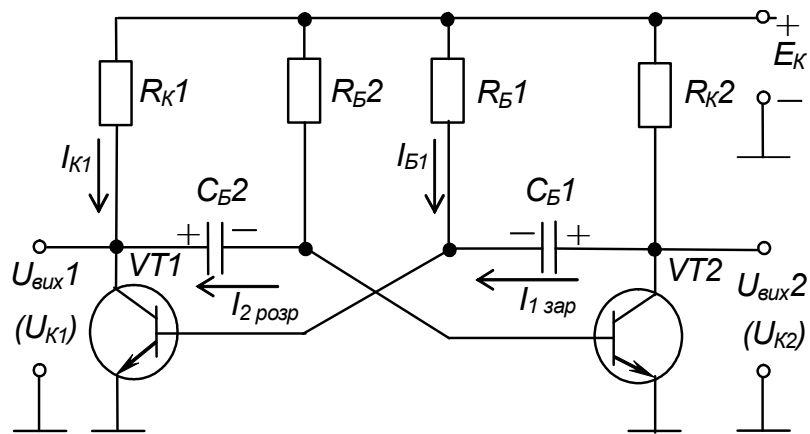


Рисунок 4.5 – Мультивібратор з колекторно-базовими зв'язками

Мультивібратор має два тимчасово сталих (квазісталих) стани, коли один із транзисторів закритий, а другий відкритий. Транзистори працюють у ключовому режимі.

Уявимо, що початковий стан мультивібратора такий: транзистор  $VT1$  знаходиться у режимі насичення (відкритий), а  $VT2$  – у режимі відтинання (закритий). При цьому і надалі:

- 1) через  $VT1$  і  $R_{K1}$  від  $E_K$  протікає колекторний струм насичення  $I_{K1}$ ;
- 2) через  $R_{B1}$  і базо-емітерний перехід  $VT1$  протікає струм бази  $I_{B1}$ , що утримує цей транзистор у режимі насичення;
- 3) конденсатор  $C_{B1}$  швидко заряджається струмом  $I_{1зар}$  від  $E_K$  через  $R_{K2}$  і базо-емітерний перехід  $VT1$ ;
- 4) конденсатор  $C_{B2}$ , заряджений із вказаною на схемі полярністю до напруги  $E_K$  (у попередньому такті роботи), через відкритий транзистор  $VT1$  підімкнений до нульової точки, з-за чого через нього протікає струм  $I_{2розр}$  від  $E_K$  через  $R_{B1}$ ; цей струм намагається перезарядити  $C_{B2}$  від напруги мінус  $E_K$  до напруги  $+E_K$ , а негативна напруга з  $C_{B2}$  подається на базу транзистора  $VT2$  відносно його емітера і утримує транзистор у закритому стані;

5) процес перезаряду конденсатора  $C_{B2}$  триває доти, доки напруга на ньому не перетне нульового рівня і не стане вищою за граничну напругу базо-емітерного переходу транзистора  $VT2$  ( $U_{BEнас} \approx 0,6$  В), після чого потече базовий струм  $VT2$  і він почне відкриватися;

6) через  $VT2$ , що перейшов у активний режим, конденсатор  $C_{B1}$  обкладкою «+» підмикається до нульової точки, і негативна напруга з  $C_{B2}$  подається на базу  $VT1$  відносно його емітера, закриваючи транзистор;

7) як тільки  $VT1$  починає закриватися, збільшується позитивна напруга на його колекторі і починає заряджатися  $C_{B2}$  від  $E_K$  через  $R_{K1}$  і базо-емітерний перехід  $VT2$ , за рахунок чого останній відкривається ще більше – діє позитивний зворотний зв'язок. У результаті цього розвивається лавиноподібний регенеративний процес, після закінчення якого  $VT1$

повністю закривається, а  $VT2$  відкривається і мультивібратор переходить до свого другого квазісталого стану.

Далі процеси протікають аналогічно, тільки тепер заряджається  $C_{B2}$ , а перезаряджається  $C_{B1}$ .

Таким чином, робота схеми забезпечується за рахунок автоматичної комутації конденсаторів ключами-транзисторами.

Умовами працездатності мультивібратора є:

$$\begin{aligned} R_{K2} \cdot C_{B1} &< R_{B2} \cdot C_{B2}; \\ R_{K1} \cdot C_{B2} &< R_{B1} \cdot C_{B1}. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Переходячи періодично з одного квазісталого стану в другий, мультивібратор формує напругу прямокутної форми, яку можна знімати з колектора будь-якого транзистора.

Описані процеси представлені у вигляді часових діаграм на рисунку 4.6.

Тривалість імпульсів, що знімаються з колекторів транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ , становить відповідно

$$t_1 \approx 0,7R_{B1} \cdot C_{B1}; \quad (4.4)$$

$$t_2 \approx 0,7R_{B2} \cdot C_{B2}. \quad (4.5)$$

Вона визначається параметрами елементів часозадаючих ланцюжків  $R_B, C_B$ , яким відповідає стала часу перезаряду  $\tau_n = R_B C_B$ .

Період надходження імпульсів

$$T \approx t_1 + t_2. \quad (4.6)$$

Для симетричного мультивібратора

$$T \approx 1,4R_B \cdot C_B. \quad (4.7)$$

Співвідношення значень  $t_1$  і  $t_2$  (щільність) можна змінювати, порушуючи симетрію схеми: наприклад, збільшуючи опір одного з базових резисторів і пропорційно зменшуючи опір іншого (за допомогою резистора  $R_5$  на рис. 4.1). При цьому тривалість періоду надходження імпульсів залишається незмінною.

Якщо змінювати опір тільки одного базового резистора або ємність одного з конденсаторів часозадаючого ланцюжка, то при постійній тривалості імпульсу (або паузи) будуть змінюватися і частота, і щільність.

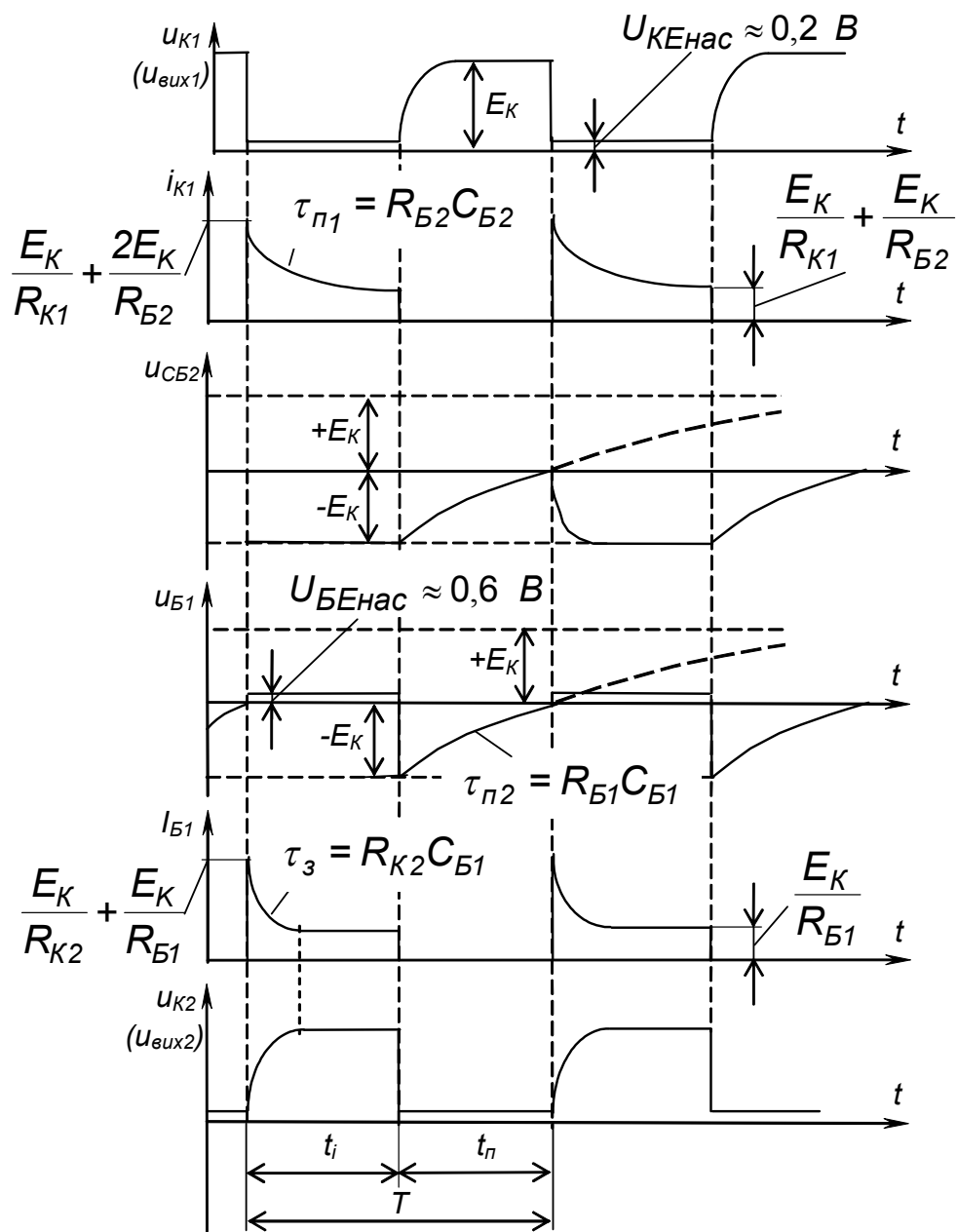


Рисунок 4.6 – Часові діаграми роботи мультивібратора з колекторно-базовими зв'язками

### 6.3 Тригери на ІМС

Тригером називається електронний пристрій, що має два сталих стани рівноваги і може переходити із одного стану в інший під дією керуючого сигналу, що перевищує деякий рівень – поріг спрацьовування пристрою. За відсутності керуючого сигналу тригер може як завгодно довго знаходитися в одному зі сталих станів.

Тригери можуть виконувати функції реле, перемикачів, елементів пам'яті. На їх основі будуються лічильники, регістри, дільники частоти та інші пристрої з пам'яттю, що відносяться до класу цифрових послідовнісних – у яких стан залежить не тільки від комбінації вхідних сигналів у даний момент часу, але і від стану в попередній момент часу.

Тригери будують на транзисторах, тиристорах та інших електронних приладах. Сучасні тригери, як правило, будують на основі двокаскадних підсилювачів з позитивним зворотним зв'язком. Тригери у інтегральному виконанні будують на логічних цифрових елементах.

Тригер на цифрових елементах має у своєму складі власне тригер (як пристрій із двома стійкими станами – елемент пам'яті) і логічний пристрій керування (ПК), що визначає функціональні можливості тригера. ПК перетворює інформацію, що надходить на його входи, у сигнали, що керують елементом пам'яті.

За способом запису інформації тригери поділяються на асинхронні, у яких запис інформації в елемент пам'яті відбувається у момент надходження сигналів на інформаційні входи ПК, і синхронні, у яких запис відбувається тільки після надходження синхронізуючого (тактуючого) сигналу на тактовий вхід ПК.

Робота тригерів (як і послідовнісних пристроїв взагалі) описується таблицями переходів, стовпці яких відповідають значенням вхідних сигналів у даний момент часу  $t^i$  і стану тригера у наступний момент часу  $t^{i+1}$ , а кількість рядків дорівнює кількості можливих комбінацій вхідних сигналів. Вхідні сигнали і стани позначають нулями й одиницями.

Тригер має два виходи, наявність високого рівня напруги на одному з яких відповідає одиничному (зведеному) стану – прямий вихід  $Q$ , а на іншому – нульовому (скиненому) стану – інверсний вихід  $\bar{Q}$ .

Стани тригерів позначають так:

0 – тригер знаходиться у нульовому стані незалежно від сигналів на входах ( $Q = 0$ );

1 – тригер знаходиться в одиничному стані незалежно від сигналів на його входах ( $Q = 1$ );

$Q$  – стан тригера не змінюється зі зміною інформації на входах;

$\bar{Q}$  – стан тригера змінюється на протилежний при зміні інформації на входах;

$X$  – невизначений стан (коли після отримання інформаційного сигналу тригер рівноможливо може опинитися у будь-якому сталому стані і, за відсутності зовнішніх сигналів керування, може знаходитися у ньому

скільки завгодно довго (але тільки за наявності живлення – маємо енергозалежну пам'ять).

Найчастіше застосовуються кілька різновидів тригерів (з практично необмеженого числа можливих).

Розглянемо тригери, що досліджуються у даній роботі.

Умовне позначення асинхронного *RS*-тригера з інверсними входами наведено на рисунку 4.7, а його робота описана таблицею переходів – таблиця 4.7.

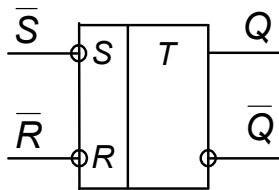


Рисунок 4.7 – Умовне позначення *RS*-тригера

Таблиця 4.7 –  
Таблиця переходів  
асинхронного  
*RS*-тригера  
з інверсними входами

$t^i$		$t^{i+1}$
$S^i$	$R^i$	$Q^{i+1}$
0	0	X
0	1	1
1	0	0
1	1	$Q^i$

З таблиці видно, що встановлення тригера у одиничний стан забезпечується подачею 0 (напруги низького рівня) на вхід *S* при 1 (напрузі високого рівня) на вході *R* (тригер керується нульовими сигналами).

Для встановлення тригера у нульовий стан комбінація вхідних сигналів повинна бути зворотною.

За умови наявності одиничних сигналів на обох входах стан тригера залишається незмінним як завгодно довго (режим збереження інформації).

Нульові сигнали на обох входах переводять тригер у невизначений стан (оскільки керуючими сигналами є нулі, то тригер у даному разі ніби повинен одночасно встановлюватися в обидва стани).

Умовне позначення *T*-тригера показано на рис. 4.8, а робота описана таблицею 4.8.

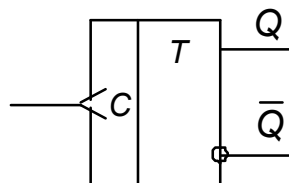


Рисунок 4.8 – Умовне позначення *T*-тригера

Таблиця 4.8 –  
Таблиця переходів  
*T*-тригера

$t^i$	$t^{i+1}$
$C^i$	$Q^{i+1}$
0	$\overline{Q^i}$
1	$Q^i$

Цей тригер має тільки один тактовий вхід, а його стан змінюється на протилежний із надходженням на вхід кожного тактового імпульсу, у даному випадку при зміні стану на вході з 1 на 0. Такі тригери застосовують у лічильниках імпульсів і дільниках частоти.

Умовне позначення  $D$ -тригера показано на рисунку 4.9, а робота описана таблицею 4.9.

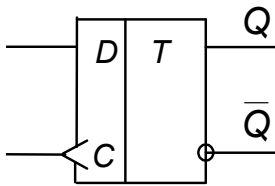


Рисунок 4.9 – Умовне позначення  $D$ -тригера

Таблиця 4.9 –  
Таблиця переходів  
 $D$ -тригера

$t^i$	$t^{i+1}$
$D^i$	$Q^{i+1}$
0	0
1	1

Цей тригер має один інформаційний вхід і один тактовий. Стан тригера у наступний момент часу відповідає стану інформаційного входу на даний момент (здійснюється затримка передачі інформації на вихід на один такт – період – синхронізуючих імпульсів).

$D$ -тригери часто використовуються для створення регістрів пам'яті (наприклад, пристрою керування дисплеєм у цифровому вольтметрі).

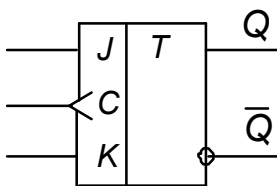


Рисунок 4.10 – Умовне позначення  $JK$ -тригера

Таблиця 4.10 –  
Таблиця переходів  
 $JK$ -тригера

$t^i$		$t^{i+1}$
$J^i$	$K^i$	$Q^{i+1}$
0	0	$Q^i$
0	1	0
1	0	1
1	1	$\overline{Q}$

Умовне позначення  $JK$ -тригера наведено на рисунку 4.10, а робота його описана таблицею 4.10.

$JK$ -тригер багато у чому аналогічний асинхронному  $RS$ -тригеру з прямими входами (керованому одиничними сигналами). Роль входів  $S$  і  $R$  виконують входи  $J$  і  $K$ . Тільки при подачі на обидва інформаційні входи одиничних сигналів тригер при надходженні тактового імпульсу переходить в стан, протилежний попередньому як  $T$ -тригер, а не у невизначений як  $RS$ -тригер.

$JK$ -тригер є універсальним, бо може виконувати роль  $RS$ -,  $T$ - або  $D$ -тригера при певних зовнішніх з'єднаннях.

Зазвичай у одному корпусі ІМС міститься від одного до чотирьох тригерів (іноді зі спільними колами керування). Вони можуть мати також додаткові входи, наприклад, установки у нульовий стан –  $R$ .

### Контрольні запитання

1. Поясніть, що таке мультівібратор, у яких режимах можуть працювати мультівібратори, для чого вони призначені?
2. Поясніть характер осцилограм напруг симетричного мультівібратора на біполярних транзисторах.
3. Поясніть, як можна змінювати частоту надходження імпульсів мультівібратора на біполярних транзисторах?
4. Поясніть, як можна змінювати щільність імпульсів мультівібратора.
5. Покажіть шляхи протікання струмів у мультівібраторі.
6. Поясніть причину спотворення фронту і як можна поліпшити форму імпульсів мультівібратора на біполярних транзисторах?
7. Поясніть будову, властивості і призначення тригерів, способи опису їхньої роботи.
8. Вкажіть різницю між асинхронним і синхронним тригерами.
9. Поясніть, як працюють RS-тригер, T-тригер, D-тригер, JK-тригер.

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Пп. 5.1 – 5.3; розд. 7).
2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 195–199, 223–232).
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. (С. 176–178, 187, 231–239).
4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 106–108, 119, 154–160).
5. Красько А. С., Скачко К. Г. Промышленная электроника: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшая школа, 1984 – 208 с. (С. 133–134, 144–151, 156–158).

# Лабораторна робота № 5

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ЦИФРОВИХ ПРИСТРОЇВ НА ІМС

### 1 Мета роботи

- 1) Дослідження логічних елементів.
- 2) Дослідження реверсивного двійково-десятькового лічильника і двійково-десятькового дешифратора.

### 2 Обладнання

- 1) Стенд лабораторний № 5, 6.
- 2) Мультиметр ВР11.
- 3) Осцилограф С1-93 (С1-83).

### 3 Зміст роботи

- 1) Дослідження роботи логічного елемента НІ у статичному і динамічному режимах.
- 2) Дослідження роботи двохходових логічних елементів АБО-НІ, І та І-НІ у статичному і динамічному режимах.
- 3) Дослідження роботи дворозрядного реверсивного двійково-десятькового лічильника.
- 4) Дослідження роботи дешифратора, що перетворює двійково-десятьковий код у десятиковий.

### 4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомитися з робочим місцем і приладами.
- 4.2 Ввімкнути вимірювальні прилади і живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у ліве положення.
- 4.3 Дослідження роботи логічних елементів робити за допомогою схеми, зображеної на рисунку 5.1 (верхня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).
- 4.4 Дослідження роботи логічного елемента НІ у статичному режимі
  - 4.4.1 Установити границю виміру мультиметра «20 V» за постійним струмом і підімкнути його до клем X4 та ⊥, дотримуючись полярності. Перемикачі SA3 і SA4 встановити у натиснуте положення, а всі інші – у ненависнуте.

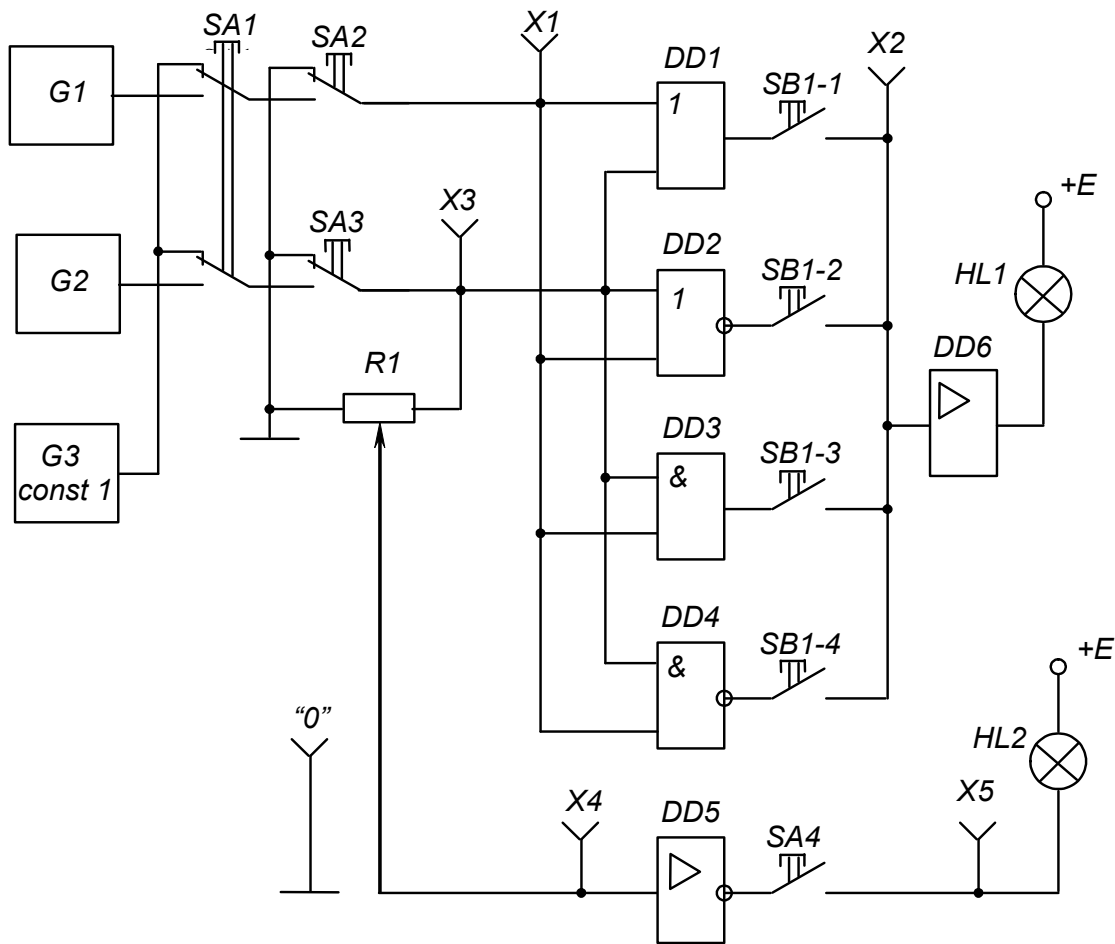


Рисунок 5.1 – Схема для дослідження логічних елементів

4.4.2 Обертаючи ручку резистора  $R_1$  із крайнього лівого положення за годинниковою стрілкою, зафіксувати момент згасання індикаторної лампи  $HL_2$ .

Записати значення вхідної напруги елемента, що відповідає його порогу спрацьовування.

4.4.3 Установивши ручку резистора  $R_1$  у крайнє праве положення, записати максимальне значення напруги вхідного сигналу (дорівнює напрузі джерела живлення  $+E$ ).

Вимкнути і від'єднати мультиметр.

#### 4.5 Дослідження роботи логічного елемента НІ у динамічному режимі

Перемикачі  $SA_1$ ,  $SA_3$  і  $SA_4$  встановити у натиснуте положення, інші – у ненаτισнуте.

Кабель першого каналу осцилографа підключити до клем  $X_4$  і  $\perp$ , а другого – до клем  $X_5$  і  $\perp$  сигнальними і нульовими провідниками відповідно. При крайньому правому положенні ручки резистора  $R_1$  установити органи керування осцилографа в положення, що забезпечують спостереження стійкого зображення.

Замалювати осцилограми імпульсів напруги на вході і виході елемента НІ.

#### 4.6 Дослідження роботи двовходових логічних елементів АБО-НІ, І та І-НІ у статичному режимі

Підмикання виходу необхідного досліджуваного елемента до підсилювача *DD6* і сигнальної лампи *HL1* виконується встановленням відповідної кнопки перемикача *SB1* у натиснуте положення.

Завдання необхідних комбінацій вхідних сигналів для кожного елемента робити перемикачами *SA2* і *SA3* (при ненаписаному положенні перемикача *SA1*).

Натиснуте положення перемикача відповідає одиничному сигналу (світиться сигнальна лампа біля кнопки перемикача), ненаписане – нульовому (лампа не світиться).

Вид вихідних сигналів елемента визначається за сигнальною лампою *HL* (за наявності одиничного сигналу вона світиться, за нульового – ні). Результати експерименту занести в таблицю 5.1 – узагальнену таблицю істинності.

Таблиця 5.1 – Узагальнена таблиця істинності логічних елементів

Вхідні сигнали		Вихідний сигнал			
<i>SA2</i>	<i>SA3</i>	<i>DD1</i> (АБО)	<i>DD2</i> (АБО-НІ)	<i>DD3</i> (І)	<i>DD4</i> (І-НІ)
0	0				
0	1				
1	0				
1	1				

#### 4.7 Дослідження роботи двовходових логічних елементів у динамічному режимі

4.7.1 Перемикачі *SA1*, *SA2*, *SA3* встановити у натиснуте положення, що забезпечить автоматичну подачу сигналів на входи логічних елементів від генераторів *G1* і *G2*.

Кабель першого каналу осцилографа підімкнути до клем *X3* і  $\perp$ , а другого – до клем *X1* і  $\perp$ .

Зарисувати одну під однією осцилограми імпульсів генераторів *G2* і *G1*, що забезпечують подачу сигналів на входи досліджуваних логічних елементів у динамічному режимі (відповідні послідовності низьких і високих рівнів напруги – нулів і одиниць).

4.7.2 Перенести сигнальний провід кабелю другого каналу осцилографа з клем *X1* на клему *X2*.

4.7.3 Перевести перемикач *SA2* у ненаписане положення і знову замалювати осцилограми вихідних сигналів досліджуваних елементів.

Замалювати осцилограми вихідних сигналів досліджуваних елементів, підмикаючи їхні виходи до клем *X2* за допомогою перемикача

*SB1* (дотримуватись необхідної орієнтації осцилограм відносно сигналів генераторів *G1* і *G2*, звіряючись з осцилограмою першого каналу осцилографа).

#### 4.8 Дослідження роботи дворозрядного реверсивного двійково-десятькового лічильника і двійково-десятькового дешифратора

4.8.1 Дослідження роботи лічильника і дешифратора виконувати за допомогою схеми, наведеної на рисунку 5.2 (нижня мнемосхема на лівій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

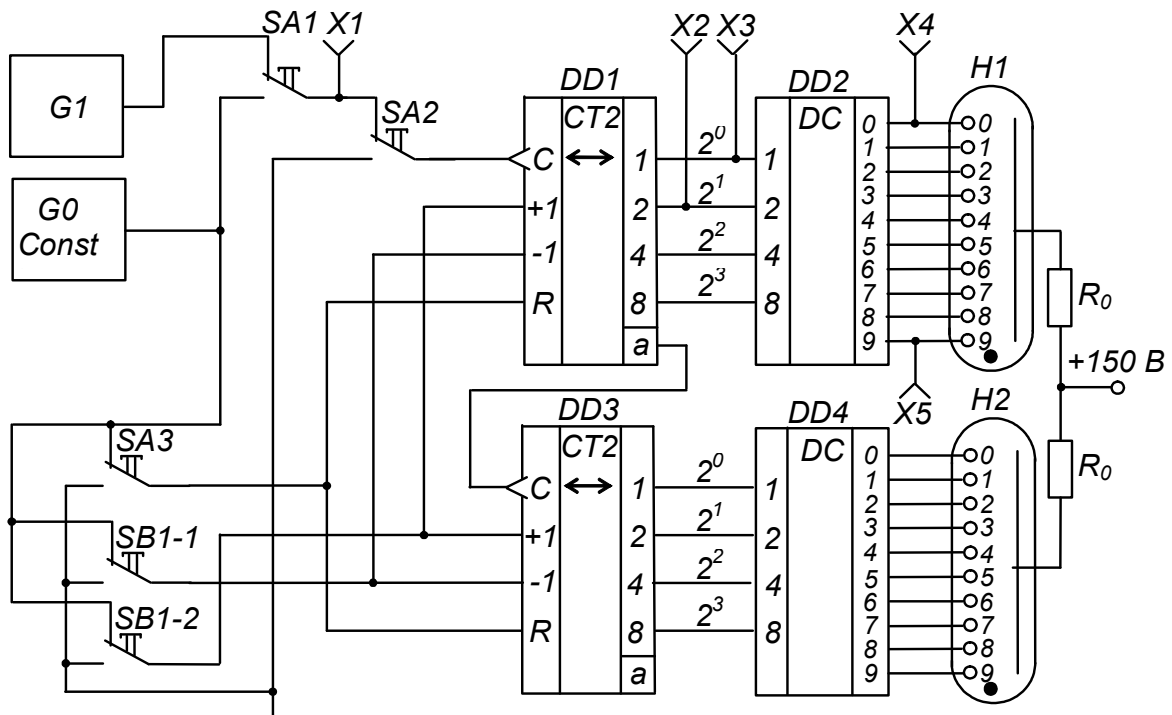


Рисунок 5.2 – Схема для дослідження дворозрядного реверсивного двійково-десятькового лічильника і двійково-десятькового дешифратора

4.8.2 Очистити лічильник (установити в нульовий стан) натисканням кнопки *SA3*.

Встановити у натиснуте положення перемикачі *SA1* і *SB1-1* – завдання роботи лічильника у режимі підсумовування.

Подаючи сигнали (імпульси) на вхід лічильника натисканням кнопки *SA2*, фіксувати стан лічильника за сигнальними лампами, що підключені до виходів його розрядів: « $2^0$ », « $2^1$ », « $2^2$ », « $2^3$ » (світяться при одиничних станах виходів). Кожне натискання на кнопку *SA2* збільшує вміст лічильника на одиницю. Двійково-десятьковий код лічильника за допомогою дешифраторів *DD2*, *DD4* перетворюється на сигнали керування цифровими індикаторами: порядковий номер вхідного імпульсу фіксується індикаторами *H1*, *H2*.

Заповнити таблицю переходів лічильника – таблиця 5.2.

Зверніть увагу, що при подачі десятого імпульсу перший розряд лічильника *DD1* (розряд одиниць) переходить у нульовий стан і відбувається запис одиниці у другий розряд *DD2* (розряд десятків).

Таблиця 5.2 – Таблиця переходів двійково-десятькового лічильника

Номер вхідного імпульсу	Стан розрядів лічильника			
	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
0 *)				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

\*) Відповідає нульовому (вихідному) стану лічильника.

4.8.3 Встановити перемикач *SBI-2* у натиснуте положення – задати роботу лічильника у режимі віднімання.

Тепер кожне натискання на кнопку *SA2* призводить до зменшення вмісту лічильника на одиницю (контролювати за індикаторними лампами і порівнювати з таблицею 5.2).

4.8.4 Встановити перемикач *SA1* у ненатиснуте положення і, задаючи режим підсумовування встановленням у натиснуте положення перемикач *SBI-1*, або віднімання – встановленням *SBI-2* у ненатиснуте положення, спостерігати за роботою лічильника в автоматичному режимі при подачі вхідних сигналів від генератора *G1*.

4.8.5 Встановити перемикач *SBI-1* у натиснуте положення (режим підсумовування).

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа до клем *X1* та  $\perp$ , а другого – до клем *X3* і  $\perp$  (перемикач осцилографа *Развёртка* встановити у положення «0,2 S»).

Замалювати осцилограми вхідних сигналів лічильника (клема *X1*) і сигналів на виході молодшого розряду лічильника  $2^0$  (клема *X3*).

Перенести сигнальний провід кабелю другого каналу осцилографа з клеми *X3* на клему *X2* і замалювати осцилограму сигналів на виході другого розряду лічильника  $2^1$ . Звернути увагу на її характер при надходженні кожного десятого вхідного імпульсу.

#### 4.9 Дослідження роботи двійково-десятькового дешифратора

Підімкнути кабель першого каналу осцилографа до клем *X3* та  $\perp$ , а другого - до клем *X4* і  $\perp$ . Замалювати осцилограми сигналів на виході першого розряду лічильника і нульовому виході дешифратора.

Перенести сигнальний провід кабелю першого каналу з клеми *X3* на клему *X5* і замалювати осцилограму сигналу на дев'ятому виході дешифратора, орієнтуючи її за осцилограмою другого каналу.

#### 4.10 Вимкнути прилади і живлення стенда лабораторного.

Навести порядок на робочому місці.

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 За результатами досліджень пп. 4.4 зробити висновок про співвідношення значень напруги одиничного вхідного сигналу елемента НІ (напруги джерела живлення) і напруги порога спрацьовування елемента.

5.2 За осцилограмами пп. 4.5 зробити висновок про фазове співвідношення вхідного і вихідного сигналів елемента НІ.

5.3 На основі аналізу таблиці істинності табл. 5.1 зробити висновок про специфіку роботи логічних елементів АБО, АБО-НІ, І, І-НІ.

5.4 Зіставити результати дослідження логічних елементів у статичному (пп. 4.6) і динамічному (пп. 4.7) режимах. Звернути увагу на те, що при ненависнутому положенні перемикача *S*A3 елемент АБО стає повторювачем сигналу, АБО-НІ – інвертором, І – генератором константи нуля –  $\text{const } 0$ , а І-НІ – генератором константи одиниці –  $\text{const } 1$ .

5.5 За осцилограмами пп. 4.8.5 зробити висновок про співвідношення тривалості періодів надходження імпульсів на вході і виходах лічильника.

5.6 На основі аналізу осцилограм за пп. 4.9 зробити висновок про моменти появи сигналів на виходах дешифратора.

### Пояснення до роботи

Основу сучасних цифрових пристроїв обробки інформації складають цифрові ІМС, призначені для перетворення й обробки інформації, представлені у вигляді електричних сигналів, що змінюються за законом дискретної функції (у двійковому або іншому дискретному коді).

Аналіз роботи цих пристроїв базується на використанні апарата математичної логіки – алгебри логіки (алгебри Буля). У її основі лежить поняття події, що оцінюється з позиції її настання: вона може статися, або не статися. Отже, кожній події можна приписати значення істинності, що моделюється, наприклад, одиницею (при електричному моделюванні – високим рівнем напруги), або хибності, що моделюється нулем (низьким рівнем напруги).

Обробка інформації, поданої у вигляді подій, ведеться у двійковій системі числення, де є тільки дві цифри: 0 і 1. Величина, котра може приймати тільки ці два значення, називається двійковою змінною.

Складна подія, що залежить від декількох двійкових змінних, називається двійковою функцією:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad x = [1, 0]. \quad (5.1)$$

Цифрові пристрої поділяються на два великих класи: комбінаційні і послідовнісні.

Комбінаційні пристрої реалізують функції, що залежать тільки від комбінації вхідних сигналів у даний момент часу і не залежать від стану пристрою в попередній момент часу.

Послідовнісні пристрої реалізують функції, що залежать не тільки від комбінації вхідних сигналів у даний момент часу, але і від стану пристрою в попередній момент часу (тобто вони мають здатність запам'ятовувати свій стан).

Найпростішою логічною функцією є заперечення (інверсія):

$$y = \bar{x}. \quad (5.2)$$

Позначення елемента, що реалізує цю функцію – елемента НІ (інвертора) – наведене на рисунку 5.3.

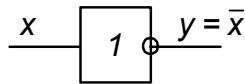


Рисунок 5.3 –  
Елемент НІ (інвертор)

У якості елемента НІ можна використати підсилювач з СЕ, що працює у ключовому режимі: за наявності високого рівня напруги на вході на виході буде низький рівень, і навпаки.

Функцію, що її виконує комбінаційний пристрій, для полегшення сприйняття часто представляють у вигляді таблиці, яку називають таблицею істинності.

Таблиця істинності має кількість стовпців, що дорівнює кількості вхідних змінних і ще один стовпець, що показує значення функції для кожної з можливих комбінацій змінних, числу яких відповідає кількість рядків таблиці.

Об'єднана таблиця істинності деяких основних логічних функцій, що залежать від двох змінних, наведена у верхній частині таблиці 5.3.

У нижній її частині міститься інформація про математичне представлення функцій, їхнє графічне позначення і можливу реалізацію.

З таблиці істинності видно, що, наприклад, функція АБО істинна, якщо істинною є хоча б одна зі змінних, що до неї входять, а функція І – тільки у випадку істинності обох змінних.

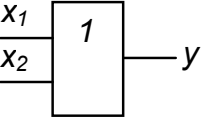
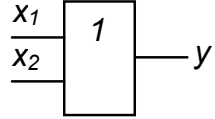
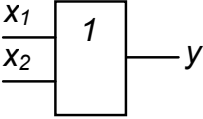
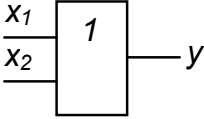
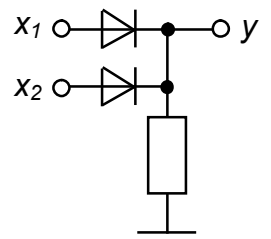
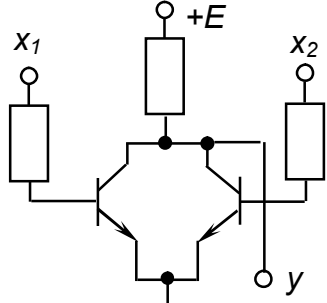
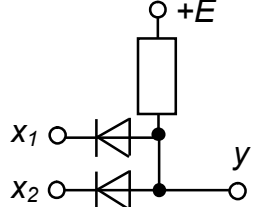
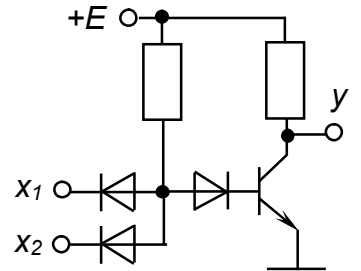
У статичному режимі робота логічних елементів досліджується при завданні на їхніх входах необхідних значень змінних і спостереженні значення на виході елемента.

У динамічному режимі завдання значень вхідних змінних здійснюється за допомогою синхронних генераторів імпульсів такої довжини, що перебір усіх можливих комбінацій вхідних сигналів забезпечується автоматично.

На рисунку 5.4 показані часові діаграми роботи логічних елементів, наведених у таблиці 5.3 у динамічному режимі (порівняйте дані таблиці з часовими діаграмами)

Кількість вхідних змінних логічного елемента теоретично може бути будь-якою. У елементів, що випускаються у вигляді ІМС середнього ступеня інтеграції, вона зазвичай становить 2 (чотири елементи в одному корпусі зі спільними колами живлення), 3 (три елементи у корпусі), 4 (два елементи), 8 (один елемент). Найчастіше це елементи І-НІ та АБО-НІ (як такі, що складають функціонально повну систему логічних елементів).

Таблиця 5.3 – Об'єднана таблиця істинності деяких двовходових логічних елементів

Вхідні змінні		Функція $y$			
$x_1$	$x_2$	АБО	АБО-НІ	І	І-НІ
0	0	0	1	0	1
0	1	1	0	0	1
1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	1	0
Математичний запис (формула)		$y = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2$	$y = \overline{x_1 + x_2}$	$y = x_1 \cdot x_2 = x_1 \wedge x_2$	$y = \overline{x_1 \cdot x_2}$
Назва функції		Логічне додавання (диз'юнкція) – функція АБО	Заперечення логічного додавання (стрілка Пірса) – функція АБО-НІ	Логічне множення (кон'юнкція) – функція І	Заперечення логічного множення (штрих Шеффера) – функція І-НІ
Графічне позначення елемента, що реалізує функцію					
Можлива реалізація					
		Резисторно-діодна логіка (РДЛ)	Резисторно-транзисторна логіка (РТЛ)	Резисторно-діодна логіка (РДЛ)	Резисторно-діодно-транзисторна логіка (РДТЛ)

Складні логічні функції реалізуються за допомогою простих.  
Наприклад, функція

$$y = \overline{\overline{(x_1 + x_2 + x_3)} \cdot x_1 + x_5 + x_4 + x_5} \quad (5.3)$$

може бути реалізована за допомогою схеми, наведеної на рисунку 5.5.

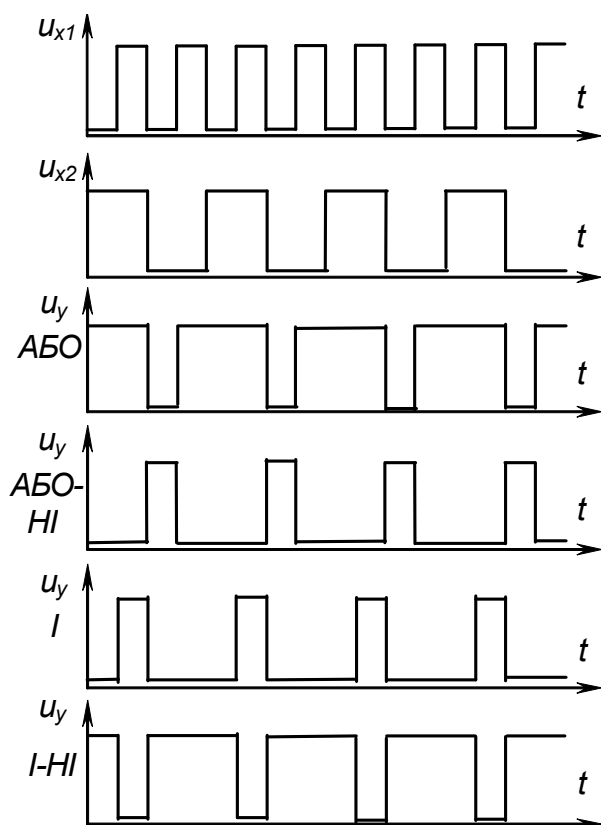


Рисунок 5.4 – Часові діаграми роботи деяких двохходових логічних елементів

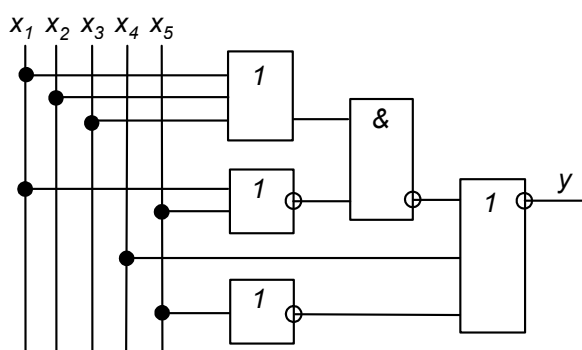


Рисунок 5.5 – Приклад схемної реалізації логічної функції

виходів, кожний з яких керує відповідним електродом десяткового індикатора. Тобто, двійково-десятковий код за допомогою цього пристрою перетворюється у десятковий. Будується дешифратор на елементах, що реалізують прості логічні функції.

При реалізації складних комбінаційних пристроїв їх спочатку описують за допомогою логічних функцій. Потім ці функції мінімізують на основі законів алгебри логіки з урахуванням специфіки застосовуваних стандартних елементів (кількість входів), наявності необхідних елементів у використаній серії ІМС. Будь-який як завгодно складний пристрій може бути реалізований за допомогою елементів І, АБО, НІ або тільки елементів АБО-НІ, або тільки І-НІ. Система таких елементів (із трьох, як І, АБО, НІ, або одного, як АБО-НІ чи І-НІ) називається функціонально повною.

Одними з найбільш широко застосовуваних різновидів комбінаційних пристроїв більш складних, ніж розглянуті логічні елементи, що реалізують найпростіші функції, є дешифратори.

Дешифратори (декодери) кожній комбінації вхідних сигналів ставлять у відповідність визначену комбінацію вихідних.

Наприклад, у досліджуваного в роботі двійково-десяткового дешифратора кожній комбінації нулів і одиниць на входах відповідає нульовий рівень на одному з

Однією з найбільш розповсюджених операцій у пристроях інформаційно-обчислювальної і цифрової вимірювальної техніки є фіксування кількості імпульсів, тобто їх підрахунок. Виконують цю операцію лічильники імпульсів, що можуть бути простими (підсумовуючими, віднімаючими) або реверсивними (суміщають властивості підсумовуючих і віднімаючих – можуть працювати у тому або іншому режимі за зовнішньою командою).

Зазвичай лічильники будуються на основі тригерів (наприклад, *T*-тригерів, з'єднаних послідовно).

Максимальне число станів такого лічильника дорівнює  $2^n$ , де  $n$  – число двійкових розрядів – тригерів.

Роботу лічильника можна описати таблицею переходів, що показує відповідність між числом вхідних імпульсів і сигналами на виходах розрядів. Робота підсумовуючого послідовного чотирьохрозрядного двійкового лічильника описується таблиці 5.4.

Як видно з цієї таблиці, код на виходах лічильника є послідовним двійковим. Це є код з вагами розрядів 8, 4, 2, 1.

Для зручності реалізації на стандартних ІМС середнього ступеню інтеграції пристроїв, що забезпечують підрахунок у десятковій системі числення, використовують двійково-десяткові лічильники. Вони відрізняються від послідовних чотирьохрозрядних двійкових тим, що мають не шістнадцять станів (від 0 до 15), а десять (від 0 до 9). Тобто перехід лічильника у нульовий стан відбувається після надходження не кожного шістнадцятого, а кожного десятого імпульсу, як це показано у таблиці 5.5.

Забезпечити перехід послідовного двійкового лічильника у нульовий стан при надходженні десятого імпульсу можна, доповнивши його комбінаційною схемою, що являє собою у даному разі двохходовий елемент І. Входи елемента підмикають до виходів другого і четвертого розрядів лічильника (див. табл. 5.4, позиція 10), а вихід – до входів установки тригерів лічильника у нульовий стан.

Часові діаграми роботи підсумовуючих послідовних чотирирозрядного двійкового і двійково-десятькового лічильників наведені на рисунку 5.6 і рисунку 5.7 відповідно. Нижні дві діаграми на рисунку 5.7 зображують вигляд сигналів на нульовому і дев'ятому виходах дешифратора.

Багаторозрядні десяткові лічильники на ІМС середнього ступня інтеграції будуються послідовним з'єднанням необхідної кількості двійково-десятькових. Підрахунок імпульсів ведеться у двійково-десятьковому коді. При цьому у межах кожного десяткового розряду – код двійковий. Це полегшує реалізацію дешифратора станів такого лічильника з будь-якою кількістю десяткових розрядів за допомогою стандартних ІМС двійково-десятькових дешифраторів.

Таблиця 5.4 – Таблиця переходів підсумовуючого послідовного чотирирозрядного двійкового лічильника

Число вхідних імпульсів (стан)	Стан виходів (розрядів) лічильника			
	$Q_8$	$Q_4$	$Q_2$	$Q_1$
	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	1	0	1	0
11	1	0	1	1
12	1	1	0	0
13	1	1	0	1
14	1	1	1	0
15	1	1	1	1
16	0	0	0	0

Таблиця 5.5 – Таблиця переходів підсумовуючого послідовного двійково-десятькового лічильника

Число вхідних імпульсів (стан)	Стан виходів (розрядів) лічильника			
	$Q_8$	$Q_4$	$Q_2$	$Q_1$
	$2^3$	$2^2$	$2^1$	$2^0$
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
2	0	0	1	0
3	0	0	1	1
4	0	1	0	0
5	0	1	0	1
6	0	1	1	0
7	0	1	1	1
8	1	0	0	0
9	1	0	0	1
10	0	0	0	0

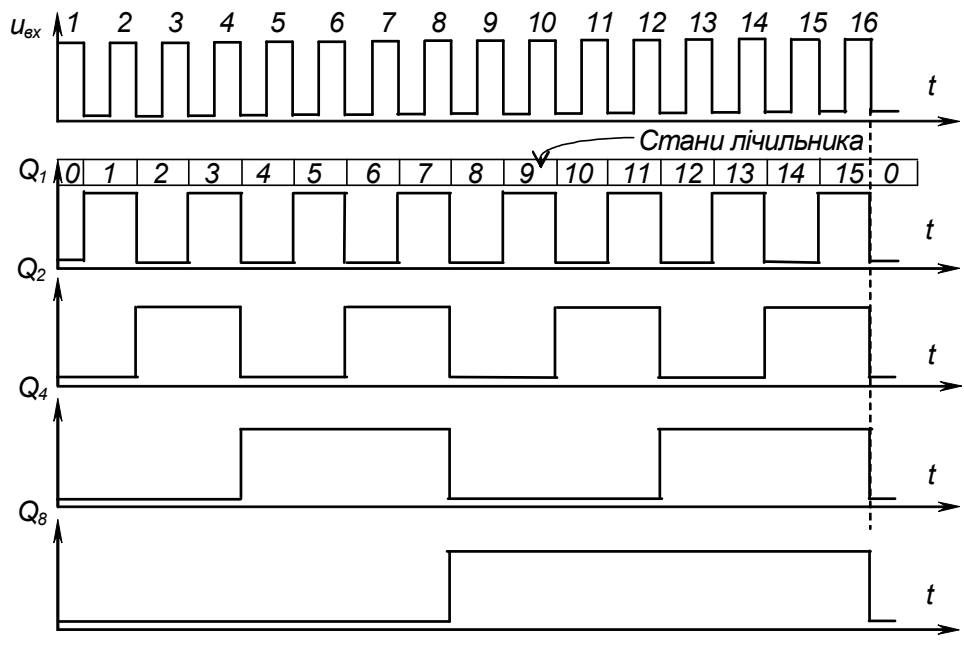


Рисунок 5.6 – Часові діаграми роботи підсумовуючого чотирирозрядного послідовного двійкового лічильника з імпульсним інверсним лічильним входом

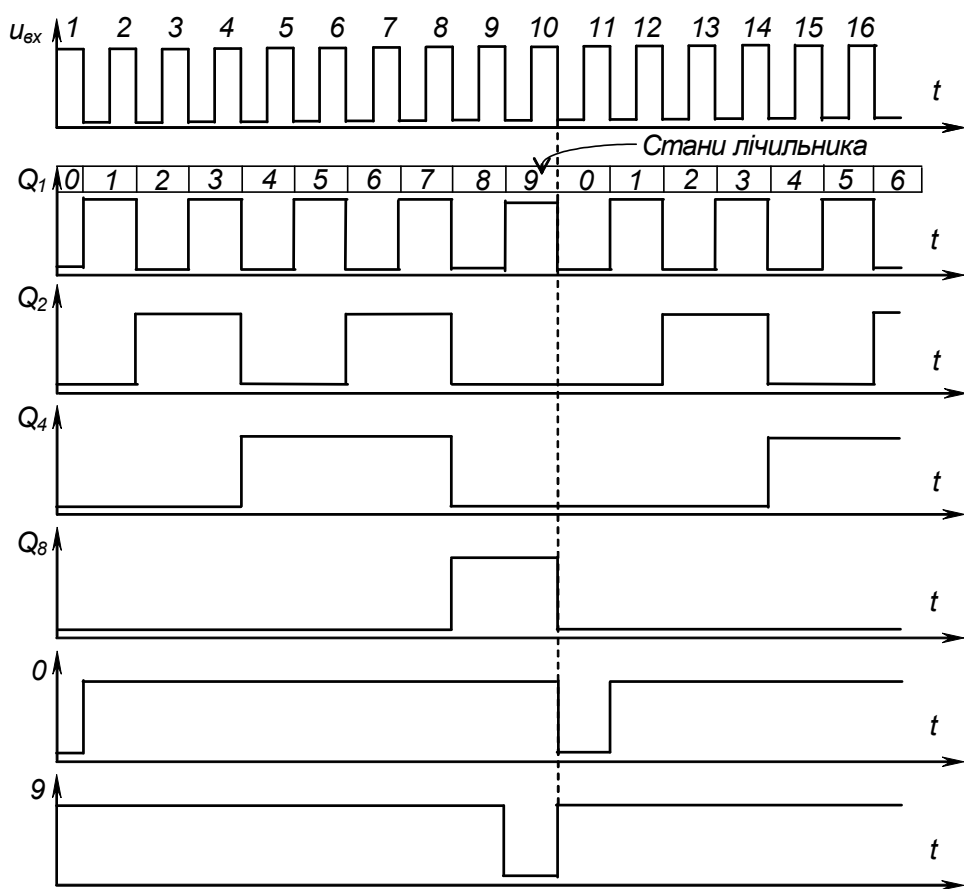


Рисунок 5.7 – Часові діаграми роботи підсумовуючого двійково-десятькового лічильника з імпульсним інверсним лічильним входом і двійково-десятькового дешифратора

### Контрольні запитання

1. Назвіть основні логічні функції, вкажіть способи їх опису, наведіть приклади реалізації.

2. Складіть з елементів, що реалізують основні логічні функції, комбінаційну схему, яка реалізує складну функцію (за формулою, заданою викладачем). Поясніть, що таке функціонально повна система логічних елементів?

3. Поясніть будову і принцип дії двійково-десятькового дешифратора.

4. Поясніть будову послідовних двійкових лічильників та чим відрізняється двійково-десятьковий лічильник від двійкового.

5. Поясніть, як представляються числа у двійково-десятьковій системі числення? Наведіть приклад.

6. Переведіть число (за завданням викладача) із двійкової або двійково-десятькової системи числення у десяткову.

7. Поясніть, як будуються багаторозрядні десяткові лічильники на ІМС середнього ступеня інтеграції?

8. Поясніть, у чому відмінність комбінаційних цифрових пристроїв від послідовних? Наведіть приклади пристроїв обох типів.

9. Поясніть роботу елементів, що реалізують основні логічні функції за таблицями істинності і часовими діаграмами.

10. Поясніть роботу послідовного двійкового і двійково-десятькового лічильників за таблицями переходів і за часовими діаграмами.

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Розд. 6; пп. 8.1 – 8.3, 8,5).

2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 65–67, 262–266, 268–270).

3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. (С. 207–231, 239–247, 254–256).

4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 134–154, 160–163, 183–187).

5. Красько А. С., Скачко К. Г. Промышленная электроника: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшая школа, 1984 – 208 с. (С. 137–144, 152–156).

# Лабораторна робота № 5М

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ (МПП)

### 1 Мета роботи

- 1) Ознайомлення зі складом МПП.
- 2) Придбання найпростіших навичок роботи з МПП.

### 2 Обладнання

Мікропроцесорна лабораторія «Микролаб КР 580ИК80».

### 3 Зміст роботи

- 1) Ознайомитись зі складом МПП.
- 2) Вивчити порядок запису інформації в оперативний запам'ятовуючий пристрій (ОЗП) МПП.
- 3) Вивчити порядок виконання програм, що містяться в постійному запам'ятовуючому пристрої (ПЗП) МПП.
- 4) Вивчити порядок введення у МПП й ініціалізації виконання програм користувача.

### 4 Порядок роботи

4.1 Ознайомитись з робочим місцем і устаткуванням.

4.2 Ознайомитись зі складом МПП

На моношасі мікропроцесорної лабораторії знайдіть основні складові вузли й елементи МПП: мікропроцесор, тактовий генератор, ОЗП, ПЗП, пристрій вводу-виводу, клавіатуру, дисплей, шину даних і шину адреси.

4.3 Запис інформації в ОЗП

4.3.1 Ввімкніть живлення мікропроцесорної лабораторії, встановивши перемикач *Сеть* блоку живлення МПП у натиснуте положення.

4.3.2 Перемикач завдання режиму роботи *АВТ-ШАГ* встановіть у положення *АВТ*.

4.3.3 Визначте вміст кількох комірок пам'яті ОЗП, для чого виконайте наступні операції:

1) натисніть клавішу клавіатури *СБРОС*: на дисплеї, від якого наведено на рисунку 5М.1, індикуються нулі у всіх розрядах, світяться вісім світлодіодів індикації стану виходів пристрою вводу-виводу (ПВВ);

2) натисніть послідовно клавіші «8», «0», «0», «0» – на дисплеї індикуються число 0000 8000;

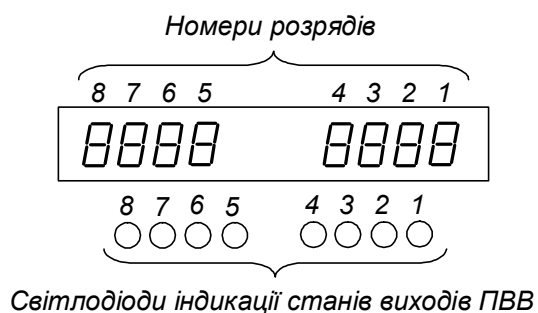


Рисунок 5М.1 – Дисплей мікропроцесорної лабораторії „Микролаб КР 580ИК80”

Таблиця 5М.1 – Дані, що зберігаються у ОЗП

Адреса ОЗП	Дані	
	шістнадцятковний код	двійковий код
8000		
8001		
8002		
8003		
8004		
8005		
8006		
8007		
8008		
8009		
800A		
800B		
800C		
800D		
800E		
800F		
8010		

таблиці 5М.2.

Таблиця 5М.2 – Дані для запису кодів у ОЗП

Адреса ОЗП	Код числа
8000	00
8001	10
8002	2A
8003	FD
8004	BE

3) натисніть клавішу установки адреси УСТ. АД – у 5, 6, 7 і 8 розрядах дисплея індикуються адреса комірки пам’яті ОЗП 8000, а у 1 і 2 розрядах – дані, що зберігаються за цією адресою (випадкове число, зумовлене станами тригерів комірки ОЗП, у які вони встановлюються після подачі живлення). Номер адреси і дані представлені у шістнадцятковому коді;

4) натискаючи клавіші збільшення номера адреси на одиницю АД+ спостерігати збільшення номера адреси у 5-8 розрядах дисплея. Запишіть у таблицю 5М.1 дані, що зберігаються за відповідними адресами. Зверніть увагу на те, що при черговому збільшенні номера адреси дані, які зберігаються за попередньою адресою, переміщуються у 3 і 4 розряди дисплея;

5) натискаючи клавішу зменшення номера адреси на одиницю АД- продивіться вміст ОЗП у зворотному порядку.

4.3.4 Запишіть у комірки ОЗП числа, вказані у

Запис виконується у наступному порядку:

- 1) наберіть код адреси 8000;
- 2) натисніть клавішу УСТ. АД;
- 3) наберіть код першого числа;
- 4) натисніть клавішу ЗАПИСЬ;
- 5) наберіть код другого числа, що повинне бути записане за адресою 8001;
- 6) натисніть клавішу ЗАПИСЬ і т.д.;

7) натискаючи клавішу *АД*–, проконтролюйте правильність набору чисел за даними 1 і 2 розрядів дисплея. При наявності помилок зробіть повторний запис за відповідними адресами.

Контроль вмісту будь-якої комірки пам'яті можна здійснити, набравши її адресу і натиснувши клавішу *УСТ. АД*.

#### 4.4 Ініціалізація виконання програм, що зберігаються у ПЗП

4.4.1 Ініціюйте виконання «музичної» програми, для чого виконайте наступні операції:

- 1) натисніть клавішу *СБРОС*;
- 2) наберіть номер адреси комірки ПЗП 0300, у якій зберігається початок програми;
- 3) натисніть клавішу *УСТ. АД*;

4) натисніть клавішу *ПУСК*. При виконанні даної програми МП через ПВВ видає на гучномовець послідовність нулів і одиниць, записану в ПЗП. Ця послідовність сформована таким чином, що сприймається як мелодія – маємо найпростіший приклад цифрового запису звуку;

5) після закінчення виконання програми (припиненні звучання мелодії) натисніть клавішу *СБРОС*.

4.4.2 Ініціюйте виконання програми, що реалізує тривходову логічну функцію I, для чого виконайте наступні операції:

1) установіть початкову адресу програми логічної функції I, набравши номер комірки ПЗП 03Е0 і натиснувши клавішу *УСТ. АД*;

2) натисніть клавішу *ПУСК* – програма, що зберігається у ПЗП, починає виконуватись у циклічному режимі;

3) набирайте за допомогою трьох перемикачів, що знаходяться у лівій нижній частині моношасі значення вхідних змінних відповідно до таблиці істинності – таблиця 5М.3 (задані значення подаються у мікропроцесор через ПВВ). За станом першого світлодіода індикації стану виходів ПВВ фіксуйте значення функції (світіння світлодіода відповідає 1, погашений стан – 0). Заповніть стовпець  $y = x_1x_2x_3$  таблиці 5М.3.

Таблиця 5М.3 – Таблиця істинності тривходової логічної функції I

Вхідні змінні			Значення функції
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$y = x_1x_2x_3$
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

#### 4.5 Виконання програм користувача

4.5.1 Ініціюйте виконання програми, що реалізує функцію порозрядного логічного множення чисел (функцію І), для чого виконайте наступні операції:

1) введіть програму наведену в таблиці 5М.4, що реалізує логічну функцію І, у ОЗП МПП. Введення здійснюється шляхом запису кодів за відповідними адресами за методикою, викладеною у пп. 4.3.4;

Таблиця 5М.4 – Програма, що реалізує логічну функцію І

Адреса	Код команди	Команда	Коментар
8000	3E	MVI A, 81	<i>Програмування інтерфейсу МПП</i>
8001	81		
8002	D3	OUT FB	
8003	FB		
8004	DB	INF A	<i>Читання даних з ПВВ у регістр А</i>
8005	FA		
8006	06	MVI B, 0A	<i>Запис числа <math>0A_{16}=00001010_2</math> в регістр В</i>
8007	0A		
8008	A0	ANA B	<i>Порозрядне логічне множення чисел, що знаходяться у регістрах А і В</i>
8009	D3	OUT F9	<i>Вивід результату на індикацію</i>
800A	F9		
800B	C3	JMP 8004	<i>Повернення на адресу 8004</i>
800C	04		<i>(зациклення програми)</i>
800D	80		

2) здійснить пуск програми, набравши її початкову адресу 8000 і послідовно натиснувши клавіші УСТ. АД і ПУСК;

3) набираючи перемикачами у нижній лівій частині моношасі коди операнду А відповідно до таблиці істинності табл. 5М.5, фіксуйте значення функції  $y = A \cdot B$  по 1-4 світлодіодах індикації стану виходів ПВВ. Заповніть відповідний стовпець таблиці 5М.5. При цьому значення розрядів  $x_1, x_2, x_3$  набираються за допомогою перемикачів, а значення  $x_4 = 0$  незмінне;

4) натисніть клавішу СБРОС.

4.5.2 Ініціюйте виконання програми, що реалізує функцію порозрядного логічного додавання чисел (функцію АБО), для чого виконайте наступні операції:

1) замініть у програмі, наведеній в таблиці 5М.4, команду ANA B (код A0 за адресою 8008) на команду ORA B – порозрядне логічне додавання чисел, що знаходяться в регістрах А і В (занесіть код B0 за адресою 8008).

2) здійснить пуск програми і її виконання, як у попередньому досліді. Заповніть стовпець  $y = A+B$  таблиці 5М.5.

3) натисніть клавішу *СБРОС*.

Таблиця 5М.5 – Таблиця істинності логічних функцій  $y = A \cdot B$  і  $y = A + B$

Значення операндів								Значення функції							
A				B				$y = A \cdot B$				$y = A + B$			
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	4	3	2	1	4	3	2	1	4	3	2	1
0	0	0	0	1	0	1	0								
0	0	1	0	1	0	1	0								
0	1	0	0	1	0	1	0								
0	1	1	0	1	0	1	0								
1	0	0	0	1	0	1	0								
1	0	1	0	1	0	1	0								
1	1	0	0	1	0	1	0								
1	1	1	0	1	0	1	0								

4.5.3 Ініціюйте виконання програми, що реалізує арифметичні операції додавання і віднімання, для чого виконайте наступні операції:

1) введіть програму, наведену в таблиці 5М.6, відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.4;

Таблиця 5М.6 – Програма, що реалізує арифметичні операції додавання і віднімання

Адреса	Код команди	Команда	Коментар
8000	90	SUB B	<i>Віднімання числа, що міститься в регістрі B з числа, що міститься в регістрі A Додавання до результату вмісту регістра C</i>
8001	81	ADD C	

2) встановіть перемикач *АВТ - ШАГ* у положення *ШАГ* (завдання режиму покрокового виконання програми);

3) занесіть за методикою пп. 4.3.4 операнди (двозначні шістнадцяткові числа) в регістри А, В і С.

Наприклад, в регістр А за адресою 83ЕВ – число  $A7_{16} = 1010\ 0111_2$ ;

в регістр В за адресою 83Е9 – число  $23_{16} = 0010\ 0011_2$ ;

в регістр С за адресою 83Е8 – число  $73_{16} = 0111\ 0011_2$ .

4) здійсніть пуск програми, набираючи її початкову адресу 8000 і натискаючи клавіші *УСТ. АД* і *ПУСК*.

У 3 і 4 розрядах дисплея індикується результат першої операції:

$$\begin{array}{r} A7_{16} = 1010\ 0111_2 \\ - 23_{16} = 0011\ 0011_2 \\ \hline 84_{16} = 1000\ 0100_2 \end{array}$$

5) натисніть клавішу повернення до виконання програми *ВОЗВР*.

Тепер у 3 і 4 розрядах індикується результат другої операції:

$$\begin{array}{r} 84_{16} = 1000\ 0100_2 \\ + 73_{16} = 0111\ 0011_2 \\ \hline F7_{16} = 1111\ 0111_2 \end{array}$$

4.5.4 Ініціюйте виконання програми, що реалізує світловий ефект, для чого виконайте наступні операції:

1) введіть програму, наведену в таблиці 5М.7, відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.4;

2) встановіть перемикач *АВТ - ШАГ* у положення *АВТ* (завдання режиму автоматичного виконання програми);

3) здійсніть пуск програми, набираючи її початкову адресу 8000 і натискаючи клавіші *УСТ. АД* і *ПУСК*.

4.5.5 Ініціюйте виконання програми, що реалізує звуковий ефект, для чого виконайте наступні операції:

1) введіть програму, наведену в табл. 5М.8, відповідно до методики, викладеної у пп. 4.3.4;

2) здійсніть пуск програми, набираючи її початкову адресу 8000 і натискаючи клавіші *УСТ. АД* і *ПУСК*;

3) натискайте клавішу 7.

4.6 Вимкніть живлення мікропроцесорної лабораторії.

Наведіть порядок на робочому місці.

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 Значення даних, що зберігаються в ОЗП МПП (див. табл. 5М.1) переведіть у двійковий код, і занесіть у відповідний стовпець табл. 5М.1. Зробіть висновок про наочність представлення чисел у двійковому і шістнадцятковому кодах.

5.2 Наведіть у загальному вигляді порядок ініціалізації виконання програм, що зберігаються в ПЗУ МПП.

5.3 Наведіть порядок виконання МПП програм користувача.

Таблиця 5М.7 – Програма, що реалізує світловий ефект

Адреса	Код команди	Помітка	Команда	Коментарі
8000 8001 8002 8003	3E 81 D3 FB	MOV A, 81	MOV A, 81   OUT FB	Програмування інтерфейсу
8004 8005 8006 8007 8008 8009 800A 800B 800C	3E 92 D3 F9 16 01 CD 22 80	SEQ	MOV A, 92  OUT F9  MVI D, I  CALL DELAY	Встановлення коду світіння 1, 4, 7 світлодіодів  Світіння заданої комбінації
800D 800E  800F 8010 8011 8012 8013 8014 8015	3E 49  D3 F9 16 01 CD 22 80		MOV A, 49   OUT F9  MVI D, I  CALL DELAY	Встановлення коду світіння 2, 5, 8 світлодіодів  Світіння заданої комбінації
8016 8017 8018 8019 801A 801B 801C 801D 801E 801F 8020 8021	3E 24 D3 F9 16 01 CD 22 80 C3 04 80		MOV A, 24  OUT F9  MVI D, I  CALL DELAY   JMP SEQ	Встановлення коду світіння 3, 6 світлодіодів  Світіння заданої комбінації  Повернення у основну програму

## Продовження таблиці 5М.7

Адреса	Код команди	Помітка	Команда	Коментарі
8022	01	DELAY	LXI B, 0025	Початок внутрішньої петлі затримки
8023	00			
8024	25	LOOP	DCX B MOV A,B ORA C JNZ LOOP	Внутрішня петля, що генерує затримку 0,786 с
8025	0B			
8026	78			
8027	B1			
8028	C2			
8029	25			
802A	80			
802B	15	DCR D	Основна петля затримки	
802C	C2	JNZ DELAY		
802D	22			
802E	80			
802F	C9		RET	Повернення

Таблиця 5М.8 – Програма, що реалізує звуковий ефект

Адреса	Код команди	Помітка	Команда	Коментарі
8000	CD	READ	CALL KEYIN	Виклик програми читання з клавіатури
8001	16			
8002	02		CPI 07	Порівняння коду ключа з 07
8003	FE			
8004	07			
8005	C2			
8006	00			
8007	80			
8008	CD			
8009	50	JNZ READ	Повернення, якщо клавіша 7 не натиснута	
800A	03	CALL BEEP	Звуковий сигнал, якщо клавіша 7 натиснута	
800B	C3			
800C	00			
800D	80			
			JMP READ	Повторення програми

## 5 Пояснення до роботи

Із розвитком технології і схемотехніки цифрових ІМС з'явилася можливість створювати складні пристрої обробки цифрової інформації у вигляді компактних ІМС великого ступеня інтеграції – великих

інтегральних схем (ВІС). Однак збільшення складності реалізованого алгоритму (послідовності) обробки інформації, як правило, звужує область застосування конкретної ІМС, робить її спеціалізованою.

Усунути протиріччя між ступенем складності ВІС і можливістю її універсального застосування вдалося за рахунок застосування програмування виконуваних функцій (у найпростішому випадку, наприклад, програмування коефіцієнта лічення лічильника).

У наш час основним типом програмованих ВІС, що мають найбільшу інформаційну потужність, є мікропроцесор.

Мікропроцесор (МП) – це програмно керований пристрій обробки цифрової інформації, виконаний у вигляді однієї (рідше кількох) ВІС.

За функціями МП аналогічний центральному процесору ЕОМ.

На основі МП виконуються такі МПП, як мікро-ЕОМ – пристрої, що містять МП, запам'ятовуючі пристрої, органи керування і засоби зв'язку із зовнішніми пристроями (інтерфейс). Якщо мікро-ЕОМ призначена для керування деяким об'єктом, вона доповнюється засобами сполучення (узгодження) з ним: датчики, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, виконавчі пристрої і т.п. Сукупність мікро-ЕОМ і засобів сполучення називають мікропроцесорною системою.

Структура такої системи наведена на рисунку 5М.2.

МП є мозком ЕОМ, у якому відбувається обробка інформації (команд і даних), що представляються у двійковому коді.

МП може вирішувати дуже складні задачі обчислення і керування, уміючи виконувати лише елементарні операції (логічні й арифметичні, операції пересилання даних, порівняння двох кодів і деякі інші) за рахунок

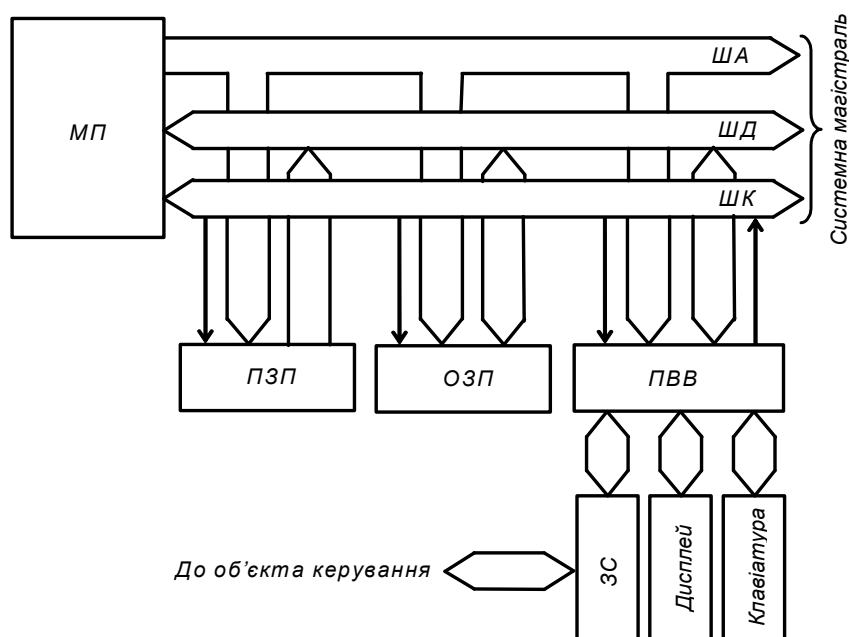


Рисунок 5М.2 – Структура мікропроцесорної системи

багаторазового їхнього повторення відповідно до заданої користувачем програми (визначеної послідовності виконання команд).

Для забезпечення виконання команд МП містить пристрої вибірки інформації з пам'яті та її дешифрування, арифметико-логічний пристрій (сукупність схем, що реалізують арифметичні і логічні операції над даними), пристрій керування (забезпечує виконання команд МП), різні регістри для тимчасового збереження і перетворення даних і команд, тактовий генератор (синхронізує і задає темп роботи МП).

ПЗП призначений для зберігання інформації, що заноситься в нього при виготовленні МПУ. Він є енергонезалежною пам'яттю, бо занесені у його комірки пам'яті коди зберігаються при вимиканні живлення. Завдяки цьому МПП після наступного вмикання живлення знає, як підготувати себе до роботи і що потрібно робити при одержанні тих або інших зовнішніх команд. ПЗП може працювати тільки у режимі видачі інформації. Вміст ПЗП можна змінити заміною його ІМС на інші з новим набором програм або перепрограмуванням (залежить від виду ІМС).

ОЗП призначений для тимчасового зберігання даних і програм користувача та проміжних результатів роботи МП. Він є енергозалежною пам'яттю, бо занесені до нього коди не зберігаються при вимиканні живлення. Якщо інформацію, що міститься в ОЗП, необхідно зберігати довгостроково, то її треба записати у зовнішній пристрій пам'яті (наприклад, на жорсткий диск).

ПВВ забезпечує зв'язок МП із зовнішніми пристроями – дисплеєм, клавіатурою, засобами сполучення ЗС і т.п.

Зв'язок між вказаними модулями МПП здійснюється на основі магістральної схеми. Відповідно до неї модулі підімкнені до системної магістралі, що складається із шини адреси (ША), шини даних (ШД) і шини керування (ШК). Кожна із шин являє собою набір деякого числа провідників.

По ША МП повідомляє, з яким із модулів чи з якою коміркою пам'яті (вказується їхній код, що називається адресою) він буде працювати у даний момент часу.

Розрядність ША (число провідників) визначає число модулів, з якими може взаємодіяти МП. Зазвичай вона складає 16, що відповідає числу  $2^{16}$  (комірок пам'яті ПЗП й ОЗП, модулів вводу, виводу і т.ін.).

По ШК МП повідомляє характер взаємодії: введення даних чи їх вивід.

По ШД дані надходять у процесор і виводяться із нього (тобто ШД двонаправлена – по одному й тому ж провіднику інформація може передаватися в обох напрямках). У кожний конкретний момент часу ШД використовується тільки для вводу або тільки для виводу.

Оскільки до ШД приєднано усі модулі одночасно, то, щоб виключити їхній взаємний вплив, підмикання до провідників шини виконується за допомогою елементів, що мають три стани: 1; 0 (логічні) і третій – відмикання від шини (нелогічний).

МП вибирає один з модулів для виводу даних на ШД, задаючи його адресу по ША. Виходи інших модулів при цьому знаходяться у третьому стані – відключені від ШД.

Розрядність ШД визначає розрядність двійкових даних, з якими може оперувати МП. Залежно від типу МП, ШД має 4, 8, 16 і більше розрядів (збільшується з розвитком ВІС). Найбільш розповсюджені сучасні МП мають восьмирозрядну ШД: обробляють двійкові числа (слова) у вигляді байт по 8 розрядів (біт).

Для забезпечення виконання МПП необхідних функцій у його ПЗП (іноді в ОЗП: одноразово або з забезпеченням безперебійного живлення) записується набір програм (стандартних – для виконання, наприклад, арифметичних і логічних операцій, обчислення тригонометричних функцій і т.п., та спеціальних, що реалізують, наприклад, алгоритми керування конкретним об'єктом).

При складанні програм програміст повинен дати МП детальний опис його дій бо МП може працювати з великою швидкістю і точністю протягом тривалого часу, але тільки за чітким завданням, що не допускає тлумачень. МПП може реагувати на зміну умов, якщо в його пам'яті є програма, що повідомляє МП, як йому поводитись у нових обставинах. МП діє логічно, але не має творчих здібностей (принаймні, у даний час). Удавана розумність МПП є результатом великого числа програм, закладених у них.

Для ініціалізації виконання програми в МП заноситься її початкова адреса (комірки ПЗП або ОЗП) і подається команда ПУСК.

При роботі МП забезпечує таку послідовність дій:

- 1) витягнення даних (коду команди, числа) з пам'яті (ПЗП або ОЗП);
- 2) розшифровка команди;
- 3) виконання команди і т.д. знову.

На робочому рівні МП реагує на список команд, представлений, як уже зазначалося, у вигляді набору двійкових кодів, називаного машинною програмою. Таке представлення програм є винятково важким для оперативного сприйняття людиною.

Деяке спрощення при написанні і читанні команд дає використання шістнадцяткової системи числення. Вона має 16 символів, кожному з яких відповідає чотирирозрядне число у двійковому коді.

Таблиця 5М.9 показує представлення чисел у десятковому, двійковому та шістнадцятковому кодах, а також представлення шістнадцяткового коду на дисплеї «Микролаб КР580ИК80».

Таблиця 5М.9 – Представлення чисел у десятковому, і шістнадцятковому кодах, та представлення шістнадцяткового коду на дисплеї «Микролаб КР580ИК80»

Десятковий код	Двійковий код	Шістнадцятковий код	Представлення в «Микролаб КР580ИК80»
0	0000	0	0
1	0001	1	1
2	0010	2	2
3	0011	3	3
4	0100	4	4
5	0101	5	5
6	0110	6	6
7	0111	7	7
8	1000	8	8
9	1001	9	9
10	1010	A	A
11	1011	B	b
12	1100	C	C
13	1101	D	d
14	1110	E	E
15	1111	F	F

Перетворити двійковий код у шістнадцятковий дуже легко: двійкове число поділяється на групи по чотири розряди, починаючи з молодшого – на тетради. Кожна тетрада замінюється відповідним шістнадцятковим символом.

При зворотному перетворенні навпаки – кожен символ замінюється двійковою тетрадою.

Наприклад:  $0111\ 1101_2 = 7D_{16}$ .

І все ж таки програма, записана в шістнадцятковому коді, залишається складною для сприйняття і розуміння.

Більш прийнятною для людини була б описова форма завдання програми – на «людській» мові. Але така форма громіздка, допускає тлумачення, незручна для введення у машину при програмуванні.

Таблиця 5М.10 – Приклади мнемонік асемблера

Команда	Мнемоніка асемблера	Шістнадцятковий код
1. Читання даних з ПВВ у внутрішній реєстр А	<i>INF A</i>	<i>DB FA</i>
2. Вивід результату на індикацію	<i>OUT F9</i>	<i>D3 F9</i>
3. Порозрядне логічне множення чисел, що знаходяться в реєстрах А і В	<i>ANA B</i>	<i>A0</i>
4. Додавання чисел, що зберігаються в реєстрах А і С	<i>ADD C</i>	<i>81</i>

Виходом є використання мови простого програмування – асемблера, що переводить слова і фрази програми, представлені у вигляді мнемонік (англійських скорочень назв), у машинний код.

Приклади мнемонік і їхнє представлення у шістнадцятковому коді наведені у таблиці 5М.10.

Програма спочатку складається у вигляді списку мнемонік, що називається вихідною програмою. Кожному коду присвоюється номер комірки пам'яті. Потім вручну або за допомогою ЕОМ програма переводиться на машинну мову. Тепер вона називається об'єктною програмою і далі заноситься у ПЗП або ОЗП.

При використанні МПП для керування можливість зміни програми ПЗП заміною ІМС або їх перепрограмуванням (у залежності від типу) забезпечує використання даного МПП у різних умовах застосування для вирішення різних задач без будь-яких змін в апаратурі – функція МПП задається програмуванням.

Поліпшення техніко-економічних характеристик МП дозволило надзвичайно ефективно використовувати їх у різних пристроях цифрової обробки інформації і керування (у якості процесорів та у периферійних пристроях ЕОМ, мікрокалькуляторах, у системах керування і регулювання потоковими лініями, верстатами-автоматами, роботами-маніпуляторами, стабілізованими джерелами живлення, в електронних пристроях – телевізорах, радіостанціях, вимірювальних приладах, іграшках і т.п.).

Це підняло на новий рівень ефективність роботи технічних пристроїв і систем.

У таблиці 5М.11 наведено співставлення основних етапів створення пристроїв керування з жорсткою логікою і програмованих.

Наостанку зазначимо, що з кінця 80-х років минулого століття з'явилися і набувають зараз надзвичайної популярності при створенні пристроїв цифрової обробки інформації і керування мікроконтролери.

Мікроконтролером називають програмно керовану ІМС, що застосовується для побудови контролерів.

<b>Пристрій керування з жорсткою логікою</b>	<b>Програмований пристрій керування</b>
<i>1. Розробка алгоритму керування</i>	
<i>2. Розробка електричної принципової схеми пристрою керування на основі обраного типу ІМС</i>	<i>2. Розробка програми роботи пристрою керування на основі обраного типу МПП</i>
<i>3. Створення макету пристрою керування</i>	<i>3. Занесення програми в ОЗУ МПП</i>
<i>4. Відладка макету пристрою керування і відповідне коригування його електричної принципової схеми</i>	<i>4. Відладка і відповідне коригування програми</i>
<i>5. Розробка конструкторської і технологічної документації для виробництва пристрою керування</i>	<i>5. Придбання типового МПП</i>
<i>6. Виробництво пристрою керування</i>	<i>6. Занесення програми в ПЗУ МПП</i>
<i>7. Поставка пристрою керування замовнику</i>	

Таблиця 5М.11 – Співставлення основних етапів створення пристроїв керування

Контролер – це закінчений електронний пристрій, зазвичай виконаний на друкованій платі і призначений для прийому та обробки сигналів від датчиків, а також для керування зовнішніми пристроями на основі результатів обробки прийнятих сигналів.

Мікроконтролер окрім МП має у своєму складі оперативний та постійний запам'ятовуючі пристрої, таймери, лічильники, канали вводу та виводу інформації, інші пристрої. Отже – це самостійна комп'ютерна система, що вміщує процесор, допоміжні схеми та пристрої вводу-виводу даних, розміщені у спільному корпусі.

### Контрольні запитання

1. Поясніть, що таке мікропроцесор і його призначення.
2. Намалюйте структуру мікропроцесорної системи і поясніть призначення її складових частин.
3. Поясніть, що таке системна магістраль і як здійснюється підмикання до неї модулів мікропроцесорної системи?
4. Поясніть, як ініціюється виконання програми мікропроцесором?
5. Поясніть, у якому вигляді може бути представлена програма роботи мікропроцесорного пристрою?
6. Поясніть, як використовується шістнадцяткова система числення при записі програм мікропроцесорного пристрою? За завданням викладача переведіть число, записане в шістнадцятковому (двійковому) коді у двійковий (шістнадцятковий) код.
7. Поясніть, у чому полягає ефективність застосування мікропроцесорів у порівнянні з іншими пристроями обробки цифрової інформації?

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (пп. 8.10).
2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 270–274).
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. (С. 256–262).
4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 168–183).

# Лабораторна робота

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЦИФРО-АНАЛОГОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА (ЦАП)

### 1 Мета роботи

Дослідження цифро-аналогового перетворювача (ЦАП) на основі матриці R-2R.

### 2 Обладнання

- 1) Панель «Цифро-аналоговий перетворювач».
- 2) Панель «Аналого-цифровий перетворювач».
- 2) Джерело живлення.
- 3) Вольтметр В7-27.
- 4) Осцилограф SDS1022DL.

### 3 Зміст роботи

- 1) Дослідження роботи ЦАП у статичному режимі.
- 2) Дослідження роботи ЦАП у динамічному режимі.
- 3) Оцінка можливостей і якості роботи ЦАП на основі проведених експериментів та аналізу їх результатів.

### 4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомитися з робочим місцем та приладами.
- 4.2 Зібрати установку для проведення досліджень за схемою, наведеною на рисунку 1.  
Встановити перемикачі у наступні положення:
  - 1) на панелі ЦАП SA1-SA3 – всі в довільних положеннях; SA5.1 – в положення «ON» (ввімкнено), SA5.2 – в довільне, що задасть роботу лічильника DD1 в підсумовуючому режимі;
  - 2) на панелі АЦП SA1.1 – в положення «OFF» (вимкнено), SA1.2 – в положення «ON» (ввімкнено), що забезпечить можливість завдання опорної напруги  $U_{ref}$  резистором R1, SA2 – в довільне.
- 4.3 Увімкнути джерело живлення панелей.  
Увімкнути осцилограф.  
Увімкнути вольтметр і задати режим вимірювання постійної напруги, встановити межу вимірювання 10 В.
- 4.4 За допомогою провідників, враховуючи полярність, підключити вольтметр до клем XS20 та XS26 панелі АЦП.

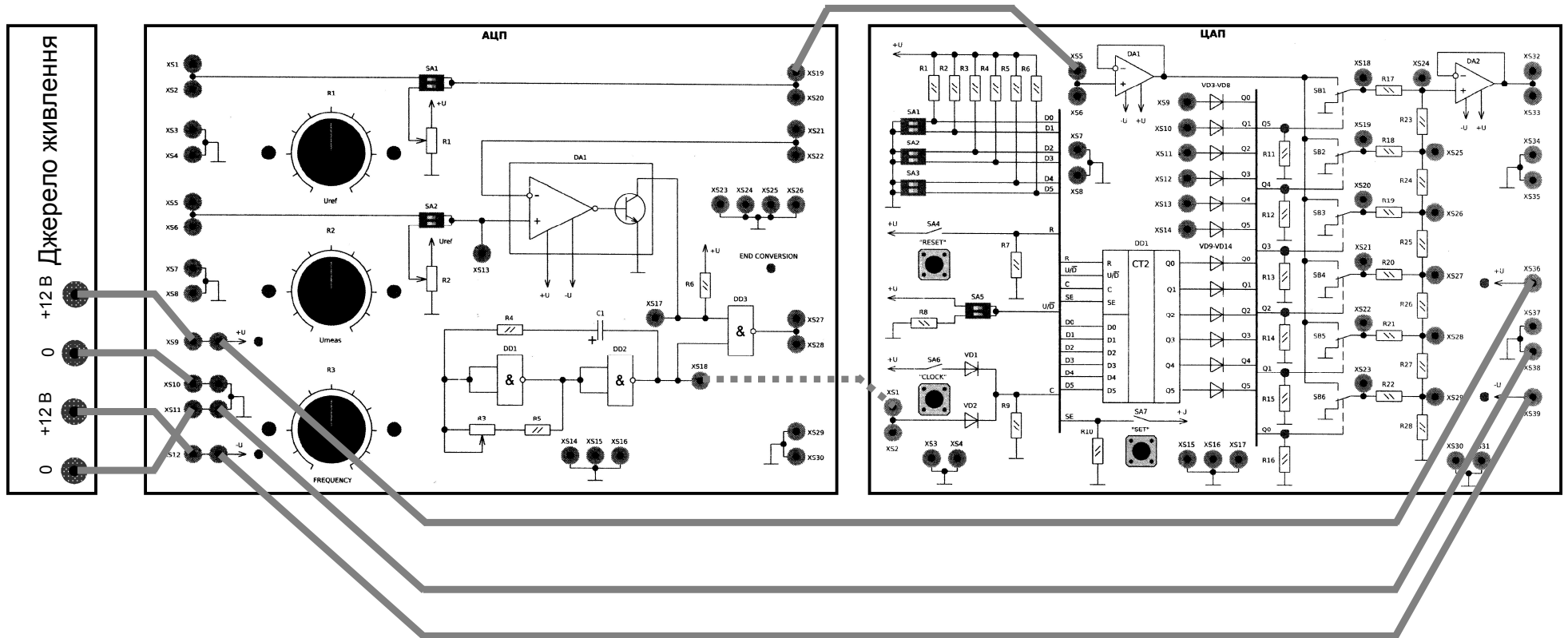


Рисунок 1 – Схема установки для проведення досліджень ЦАП

Примітка. Провідник, що з'єднує клеми XS18 панелі АЦП та XS1 панелі ЦАП, встановлюється при виконанні пункту 7.

Резистором R1 панелі АЦП встановити значення опорної напруги ЦАП  $U_{ref} = 6,3 \text{ В}$ .

Визначити дискретність перетворення

$$\Delta = U_{ref}/(2^n - 1) = 6,3/(2^6 - 1) = 0,1 \text{ В}.$$

4.5 Підключити вольтметр до клем XS33 та XS34 панелі ЦАП для вимірювання вихідної напруги ЦАП.

4.6 Дослідження роботи ЦАП у статичному режимі

4.6.1 Натиснути кнопку SA4 «RESET» панелі ЦАП для встановлення лічильника DD1 в нульовий стан. Зафіксувати і занести до таблиці 1 значення напруги на виході ЦАП, що відповідає його вхідному коду 000000.

4.6.2 Натискаючи кнопку SA7 «CLOCK» панелі АЦП, збільшувати значення коду в лічильнику за кожного натискання на одиницю. Контролювати двійкові коди за світінням світлодіодів, що відповідають розрядам лічильника Q5, Q4, Q3, Q2, Q1, Q0. Відповідні значення напруги на виході ЦАП занести до таблиці 1.

4.7 Дослідження роботи ЦАП у динамічному режимі

4.7.1 З'єднати клеми XS18 панелі АЦП та XS1 панелі ЦАП – подати на вхід лічильника DD1 сигнал з виходу мультивібратора, побудованого на елементах DD1 та DD2 панелі АЦП.

4.7.2 Сигнальний кабель першого каналу осцилографа підімкнути до клем XS2 та XS3 панелі ЦАП для спостереження сигналу мультивібратора.

4.7.3 Сигнальний кабель другого каналу осцилографа підімкнути до клем XS33 та XS35 панелі ЦАП для спостереження сигналу з виходу ЦАП.

4.7.4 Встановити органи керування осцилографа так, щоб отримати зображення, наведене на рисунку 2. З рисунку видно, що при надходженні імпульсів мультивібратора на вхід лічильника на виході ЦАП формується лінійно зростаюча (пилкоподібна) напруга. Зарисувати осцилограми.

4.7.5 Змінити положення органів керування осцилографа так, щоб отримати зображення, наведене на рисунку 3. Спостерігати, як кожному імпульсу мультивібратора відповідає сходинка вихідної напруги ЦАП. Зарисувати осцилограми.

4.7.6 Сигнальний кабель першого каналу осцилографа підімкнути до клем XS18 та XS7 панелі ЦАП для спостереження сигналу старшого розряду входу ЦАП. Встановити органи керування осцилографа так, щоб отримати зображення, наведене на рисунку 24. Спостерігати, як за період коливаний старшого розряду формується пилкоподібний сигнал на виході ЦАП. Зарисувати осцилограми.

4.7.7 Змінюючи положення ручки резистора R3 «FREQUENCY» панелі АЦП, спостерігати, як змінюються періоди надходження імпульсів мультивібратора та вихідної пилкоподібної напруги ЦАП.

4.8 Вимкнути живлення вольтметра і лабораторного стенду.

Навести порядок на робочому місці.



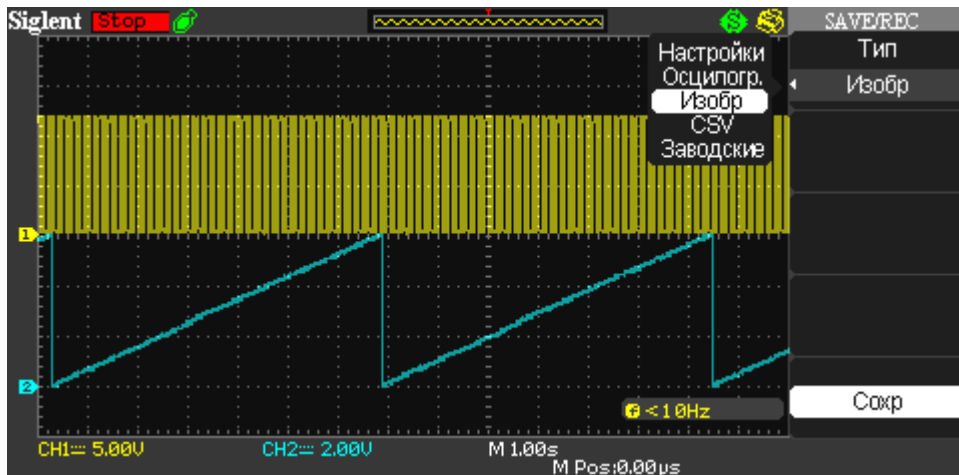


Рисунок 2 – Сигналы мультивибратора (канал 1) та з виходу ЦАП (канал 2)

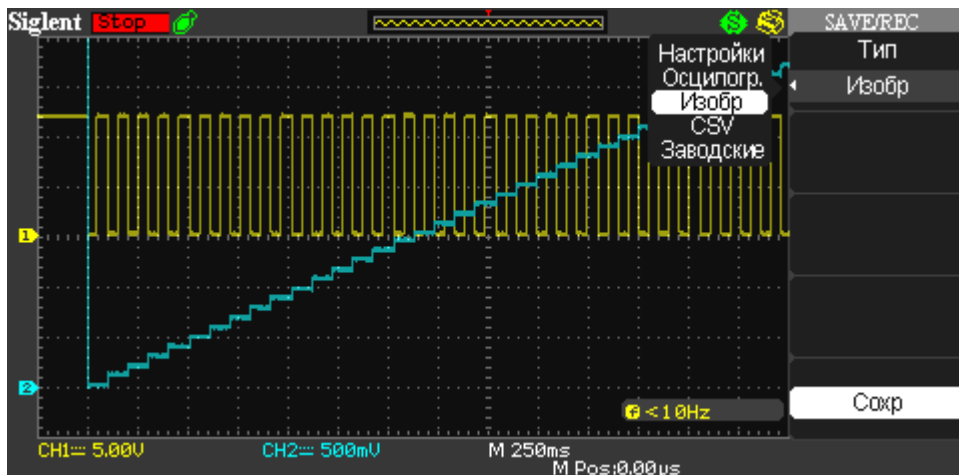


Рисунок 3 – Сигналы мультивибратора (канал 1) та з виходу ЦАП (канал 2)

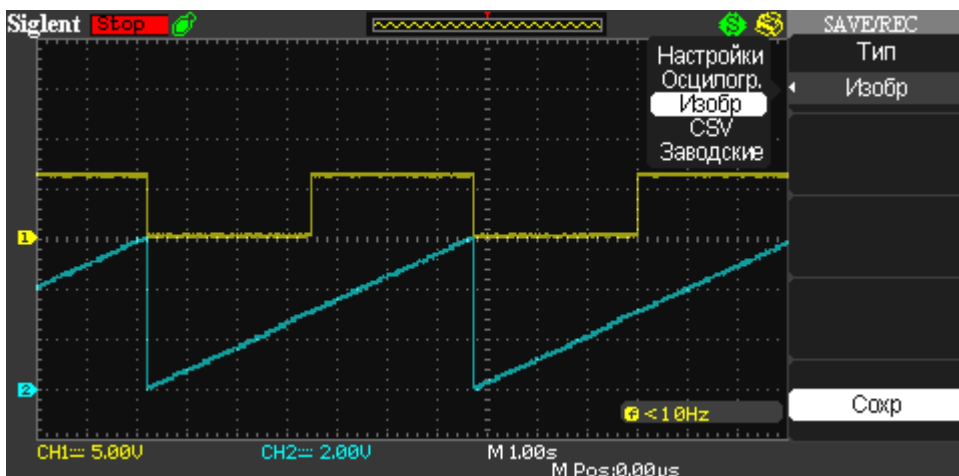


Рисунок 4 – Сигналы старшего разряда входа ЦАП (канал 1) та з виходу ЦАП (канал 2)

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 За даними таблиць побудувати вихідну характеристику ЦАП, та визначити коефіцієнт перетворення, абсолютну похибку перетворення в кінцевій точці шкали, напругу зміщення нуля на вході та виході, нелінійність ЦАП.

5.2 За осцилограмами визначити час встановлення вихідної напруги.

5.3 За отриманими результатами зробити висновки щодо можливостей та якості цифро-аналогового перетворювача.

## 6 Пояснення до роботи

Інтенсивне впровадження до галузей народного господарства і побуту мікропроцесорної техніки висунуло важливу задачу щодо організації зв'язку цифрових обчислювальних та керуючих пристроїв з об'єктами, обмін інформацією з якими відбувається у аналоговій формі.

Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) призначені для перетворення цифрових сигналів, що надходять з виходу мікропроцесора, у безперервні за часом аналогові сигнали, необхідні для роботи аналогових виконавчих пристроїв. Наприклад, системи імпульсно-фазового керування (СІФК) керованого випрямляча, що регулює струм у якорі двигуна постійного струму. ЦАП є обов'язковим елементом системи автоматичного регулювання, за використання мікропроцесора у колі керування для обробки інформації.

ЦАП являє собою пристрій для автоматичного декодування вхідних величин (напруги або струму), представлених числовим кодом, у еквівалентне значення заданої фізичної величини. Кількісний зв'язок між вхідною числовою величиною  $N_i$  та її аналоговим еквівалентом  $A(t_i)$ , що характеризує алгоритм цифро-аналогового перетворення, має вигляд

$$A(t_i) = N_i \cdot \Delta A + \delta \cdot A_i, \quad (1)$$

де  $\Delta A$  – аналоговий еквівалент одиниці молодшого розряду коду;

$\delta \cdot A_i$  – похибка перетворення.

ЦАП виготовляються здебільшого в інтегральному виконанні. При цьому орієнтуються на їхнє застосування в різноманітних мікропроцесорних та інших системах обробки даних.

Існують два найбільш розповсюджених способи цифро-аналогового перетворення за яких використовують:

- резисторну матрицю з двійково-зваженими опорами;
- резисторну матрицю з двома значеннями опорів, яку називають матрицею R-2R.

На рисунку 5 зображено найпростіший ЦАП, що працює за першим способом перетворення.

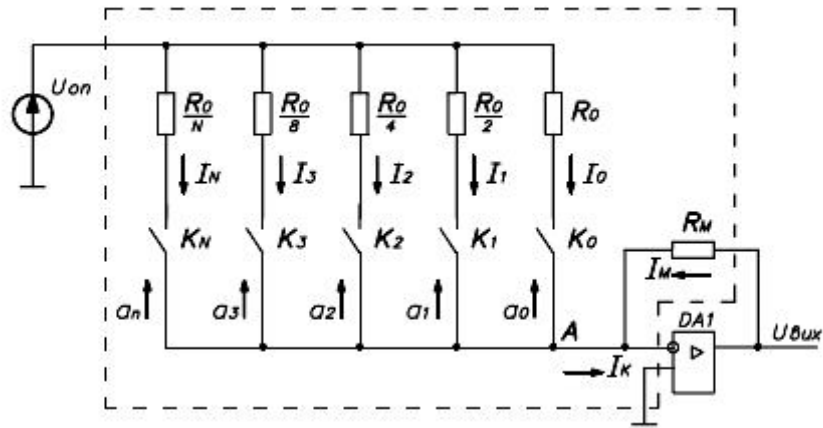


Рисунок 5 – ЦАП на основі матриці з двійково-зваженими опорами

Як можна бачити, до складу ЦАП входять: резисторна матриця; електронні ключі  $K_0 - K_n$ , що керуються паралельним цифровим кодом ( $a_0 - a_n$ ); резистор зворотного зв'язку  $R_M$ . Джерело опорної напруги  $U_{оп}$  та операційний підсилювач  $DA1$  не входять до складу інтегрального ЦАП. Опори резисторів вибирають такими, щоб при замкнених ключах через них протікав струм, що відповідає вазі розряду. Ключі  $K_0 - K_n$  замикаються тоді, коли у відповідний розряд вхідного цифрового коду надходить логічна одиниця. Завдяки тому, що операційний підсилювач  $DA1$  через  $R_M$  охоплено петлею негативного зворотного зв'язку, вузол підсумовування  $A$  має нульовий потенціал ( $DA1$  вважаємо за ідеальний). Маємо суматор струмів. При цьому виключається взаємний вплив складових струму  $I_k$ .

Для даного типу ЦАП вихідну напругу  $U_{вих}$  можна подати у вигляді залежності

$$U_{вих} = -U_{оп} \cdot \frac{R_M}{R_0} \cdot (n \cdot a_n + \dots + 8 \cdot a_3 + 4 \cdot a_2 + 2 \cdot a_1 + a_0), \quad (2)$$

де  $a_0 \dots a_n$  можуть приймати значення 0 або 1.

Опір кожного резистора менший за опір попереднього вдвічі. Від точності виготовлення цих резисторів залежить похибка перетворення. Найбільш жорсткі вимоги висуваються щодо точності опорів резисторів старших розрядів, оскільки струмів через них не повинен перевищувати значення струму молодшого розряду. Тому розкид опорів у  $2^n$  розряді повинен бути меншим, ніж

$$\frac{\Delta R}{R} = 2^{\frac{1}{n+1}}. \quad (3)$$

З цього витікає, що розкид опорів у  $2^4$  розряді не повинен перевищувати 3%, а у  $2^{10}$  розряді не більше 0,05%. Така висока точність виготовлення у інтегральному виконанні ЦАП в умовах серійного виробництва є недосяжною. Крім того, на електронних ключах у моменти комутації виникають сплески напруги, нерівномірно навантажується

джерело опорної напруги. Всі ці фактори знижують метрологічні характеристики ЦАП.

Для отримання більш високої точності, частіше застосовується резисторна матриця типу R-2R. Спрощена принципова схема такого ЦАП наведена на рисунку 6. Розглянемо її роботу.

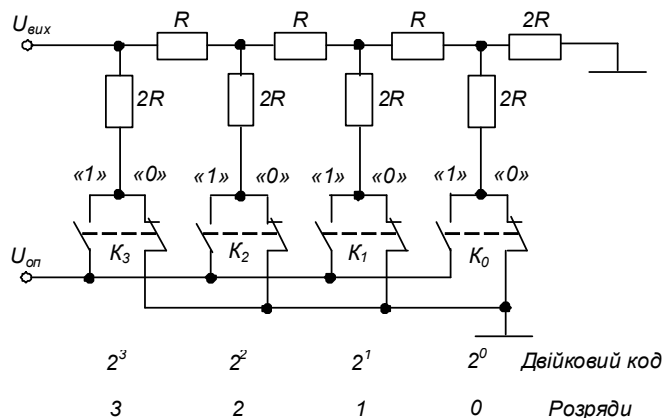


Рисунок 6 – ЦАП на матриці типу R-2R

Очевидно, що якщо всі ключі знаходяться в положенні «0», то вихідна напруга буде дорівнювати нулю.

Можна порахувати, якщо ключ нульового розряду встановлено в положення «1», а всі інші в положення «0», то

$$U_{вих} = U_{оп} \cdot 1/16. \quad (4)$$

Якщо ключ першого розряду встановлено в положення «1», а всі інші в положення «0», то

$$U_{вих} = U_{оп} \cdot 1/8. \quad (5)$$

Якщо ключі нульового і першого розрядів встановлені в положення «1», а всі інші в положення «0», то

$$U_{вих} = U_{оп} \cdot (1/16 + 1/8) \quad (6)$$

і так далі.

У загальному випадку отримаємо:

$$U_{вих} = U_{оп} \cdot (A_0 \cdot 1/16 + A_1 \cdot 1/8 + A_2 \cdot 1/4 + A_3 \cdot 1/2), \quad (7)$$

де  $A_i = 1$ , якщо відповідний ключ  $K_i$  знаходиться в положенні «1» і  $A_i = 0$ , якщо відповідний ключ знаходиться в положенні «0».

Тобто, замикаючи різними способами ключі  $K_0-K_3$  (або, інакше кажучи, подаючи на вхід чотири розрядне число  $A_3A_2A_1A_0$ ) ми можемо отримати  $2^4 = 16$  різних значень вихідної напруги (від  $U_{вих} = 0$  до  $U_{вих} = U_{оп} \cdot (1 - 1/16)$  з кроком  $\Delta = U_{оп} \cdot 1/16$ ).

Таким чином, дана схема є простим паралельним чотирирозрядним цифро-аналоговим перетворювачем.

Аналогічно можна побудувати восьми, десяти, дванадцяти і взагалі n-розрядний ЦАП.

У загальному випадку, для n-розрядного ЦАП матимемо:

$$U_{вих} = U_{оп} \cdot \sum (A_i \cdot 1 / 2^{n-i}), \quad (8)$$

де  $i$  – номер розряду ( $i = 0, 1, 2 \dots n-1$ ),

$A_i = 1$ , якщо відповідний ключ замкнутий на шину живлення та

$A_i = 0$ , якщо відповідний ключ замкнутий на нульовий провід.

Крок в цьому випадку визначається за формулою:

$$\Delta = U_{оп} / 2^n, \quad (9)$$

де  $n$  – загальне число розрядів.

Отже, для отримання високої точності та швидкодії перетворення у інтегральних ЦАП частіше застосовується резисторна матриця типу R-2R. Спрощена принципова схема такого ЦАП наведена на рисунку 7.

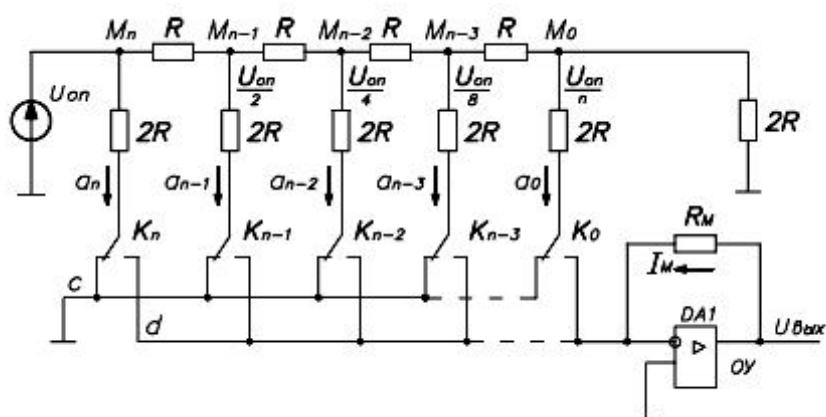


Рисунок 7 – ЦАП на основі матриці R-2R

Основним елементом матриці R-2R є дільник напруги, що складається з  $n$  резисторів  $R$  однакового опору. Коли керуючий цифровий сигнал має значення 1, кожний з резисторів  $2R$  через відповідний електронний ключ з  $K_n-K_0$  під'єднується до інвертувального входу операційного підсилювача (шина  $d$ ), що працює у режимі підсумовування струмів. Коли керуючий цифровий сигнал має значення 0, то ключ під'єднує резистор  $2R$  до шини  $c$  (точка з нульовим потенціалом). При цьому струм у резисторах  $2R$  не змінюється, а отже, опір, що підімкнено до джерела опорної напруги, є незмінним – джерело опорної напруги  $U_{оп}$  у процесі роботи навантажене рівномірно. Також не виникають значні викиди напруги на ключах при їхній комутації, що підвищує швидкодію.

Розглянемо роботу ЦАП для випадку, представленому на еквівалентній схемі ЦАП, наведеній на рисунку 8. Ситуація відповідає вхідному коду 100...00: якщо ключ  $K_n$  старшого розряду підімкнено до джерела опорної напруги  $U_{оп}$  та до шини  $d$ , а інші ключі замкнені на шину  $c$ . Еквівалентний опір кіл з правої сторони від вузла  $M_n$ , дорівнює  $2R$ , бо інвертуючий вхід  $ОП$  фактично має нульовий потенціал. Еквівалентний опір зверху від вузла  $M_n$  також дорівнює  $2R$ .

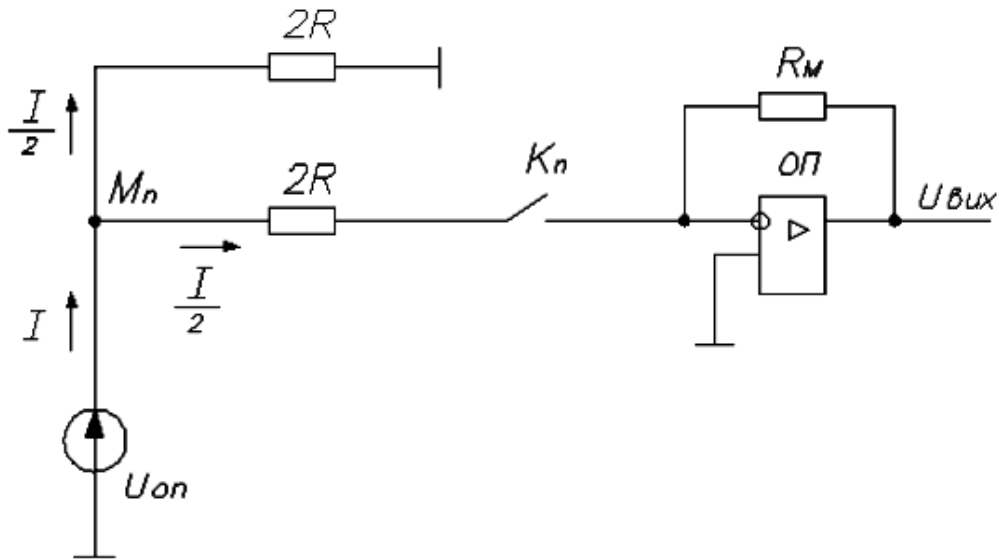


Рисунок 8 – Еквівалентна схема ЦАП на основі матриці R-2R для вхідного коду 100...00

Струм, що виникає під дією джерела опорної напруги, у вузлі  $M_n$  ділиться навпіл, що забезпечує на виході ОП напругу

$$U_{vux} = -\frac{1}{2} I \cdot R_M = -\frac{1}{2} U_{on} \cdot \frac{R_M}{R} \quad (10)$$

Тепер розглянемо роботу ЦАП у випадку, коли ключ  $K_{n-1}$  замкнений та вузол  $M_{n-1}$  через опір  $2R$  підімкнений до шини  $d$ , а всі інші ключі вимкнені та їхні резистори  $2R$  з'єднані з шиною  $c$ . Еквівалентна схема такого ЦАП показана на рисунку 9.

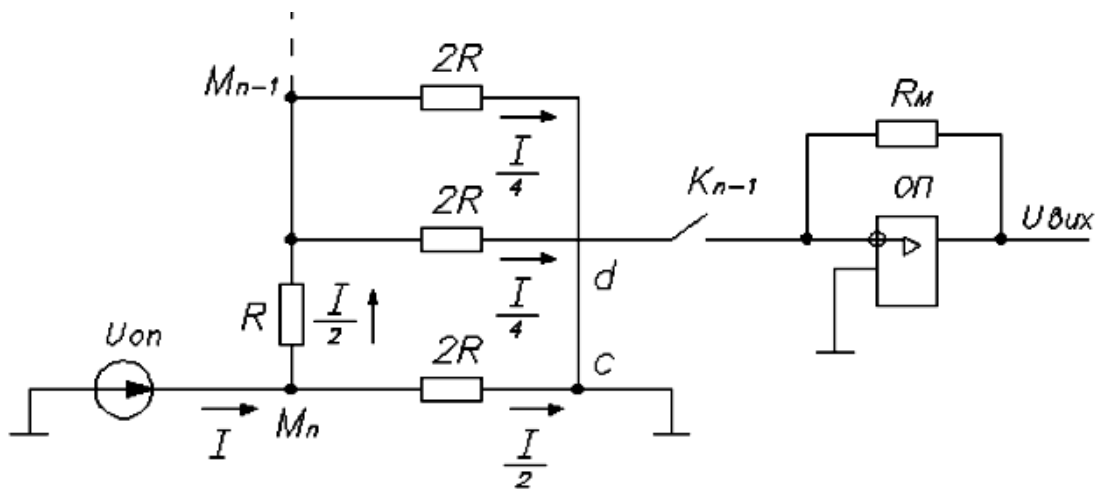


Рисунок 2.9 – Еквівалентна схема ЦАП на основі матриці R-2R для вхідного коду 010...00

Струм  $\frac{1}{2}I$  у вузлі  $M_{n-1}$  для цього випадку знову ділиться навпіл і вихідна напруга становить

$$U_{вих} = -\frac{1}{4}I \cdot R_M = -\frac{1}{4}U_{он} \cdot \frac{R_M}{R}. \quad (11)$$

Те ж саме відбувається і з іншими розрядами ЦАП. Тому кінцева формула виглядає так:

$$\begin{aligned} U_{вих} &= U_{он} \cdot \frac{R_M}{R} (a_{n-1} \cdot 2^{-1} + a_{n-2} \cdot 2^{-2} + \dots + a_1 \cdot 2^{-(n-1)} + a_0 \cdot 2^{-n}) = \\ &= U_{вих} = U_{он} \cdot \frac{R_M}{2^n R} \cdot \sum_{i=1}^{n-1} a_i \cdot 2^i \end{aligned} \quad (12)$$

Таким чином, вихідна напруга ЦАП пропорційна сумі напруг зі своїми вагами, обумовленими ключами, що під'єднані до джерела опорної напруги.

Необхідно підкреслити, що час перетворення такого ЦАП складає не більше 5 мкс.

До основних параметрів ЦАП відносяться:

1) діапазон зміни вхідних та вихідних значень (динамічний діапазон) – визначається як відношення максимальних значень вхідної та вихідної величин перетворення до їх мінімальних значень:

$$\Delta D = \frac{N_{\max}}{N_{\min}} = \frac{X_{\max}}{X_{\min}}, \quad (13)$$

де  $N_{\max}$ ,  $N_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення двійкового керуючого коду;

$X_{\max}$ ,  $X_{\min}$  – максимальне та мінімальне значення вихідної напруги ЦАП.

При лінійному перетворенні вхідні та вихідні значення мають однаковий динамічний діапазон, який виражають числом розрядів цифрового вхідного коду. У випадку, якщо мінімальне значення дорівнює нулю, діапазон зміни

$$\Delta D = \frac{N_{\max}}{\delta N} = \frac{X_{\max}}{\delta X}, \quad (14)$$

де  $\delta N$ ,  $\delta X$  – припустимі абсолютні похибки перетворення;

2) число розрядів  $n$  – кількість розрядів коду, що пов'язаний з аналоговою величиною, що може бути прийнята ЦАП (відповідно до ГОСТ 24736-81 під числом розрядів необхідно розуміти двійковий логарифм максимального числа кодових комбінацій на вході ЦАП);

3) коефіцієнт перетворення  $K_{пер}$  – відношення прирощення вихідного сигналу до прирощення вхідного сигналу;

4) абсолютна похибка перетворення (мультиплікативна похибка) у кінцевій точці шкали  $\delta_{ми}$ , що є відхиленням вихідної напруги від номінального значення, яке відповідає кінцевій точці характеристики перетворення;

5) напруга зміщення нуля на виході (адитивна похибка) при вхідному коді, що відповідає нульовому значенню;

6) диференціальна нелінійність – відхилення різниці двох аналогових сигналів, що відповідають двом сусіднім кодам, від значення одиниці молодшого розряду;

7) час встановлення вихідної напруги  $t_{ycm}$  – інтервал часу від моменту заданої зміни коду на виході ЦАП до моменту, коли вихідна аналогова напруга увійде до ширини зони перетворення, як показано на рисунку 10;

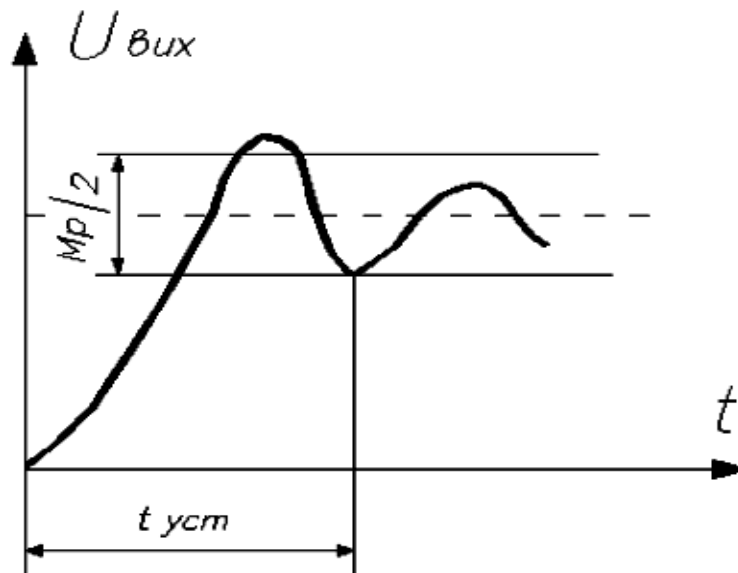


Рисунок 10 – До визначення часу встановлення вихідної напруги

8) викид вихідної напруги, що визначається амплітудою імпульсу напруги на виході ЦАП при зміні коду на вході (одною з причин виникнення викидів є неідентичність характеристик електронних ключів; найбільше значення викидів вихідної напруги виникає при зміні кодових комбінацій 011...1 на 100...00, бо в цьому випадку в процесі перемикання приймають участь всі ключі).

### Контрольні запитання

1. Сформулюйте, що називається цифро-аналоговим перетворювачем.
2. Вкажіть області застосування ЦАП.
3. Вкажіть основні параметри ЦАП.
4. Поясніть, що називається часом встановлення вихідної напруги.
5. Наведіть схему ЦАП з двійково-зваженими опорами.
6. Наведіть схему ЦАП з резисторною матрицею  $R-2R$ .

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Розд. 8.7.1).

**Лабораторна робота**  
**ДОСЛІДЖЕННЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО**  
**ПЕРЕТВОРЮВАЧА (АЦП)**

**1 Мета роботи**

Дослідження аналого-цифрового перетворювача .

**2 Обладнання**

- 1) Панель «Аналого-цифровий перетворювач».
- 2) Панель «Цифро-аналоговий перетворювач».
- 2) Джерело живлення.
- 3) Вольтметр В7-27.
- 3) Мультиметр.
- 4) Осцилограф SDS1022DL.

**3 Зміст роботи**

- 1) Дослідження роботи АЦП у статичному режимі.
- 2) Дослідження роботи АЦП у динамічному режимі.
- 3) Оцінка можливостей і якості роботи АЦП на основі проведених експериментів та аналізу їх результатів.

**4 Порядок виконання роботи**

4.1 Ознайомитися з робочим місцем та приладами.

4.2 Зібрати установку для проведення досліджень за схемою, наведеною на рисунку 1.

Встановити перемикачі у наступні положення:

- 1) на панелі ЦАП SA1-SA3 – всі в довільних положеннях;  
SA5.1 – в положення «ON» (ввімкнено), SA5.2 – в довільне, що задасть роботу лічильника DD1 в підсумовуючому режимі;
- 2) на панелі АЦП SA1.1 – в положення «OFF» (вимкнено), SA1.2 – в положення «ON» (ввімкнено), що забезпечить можливість завдання опорної напруги Uref резистором R1, SA2 – в довільне.

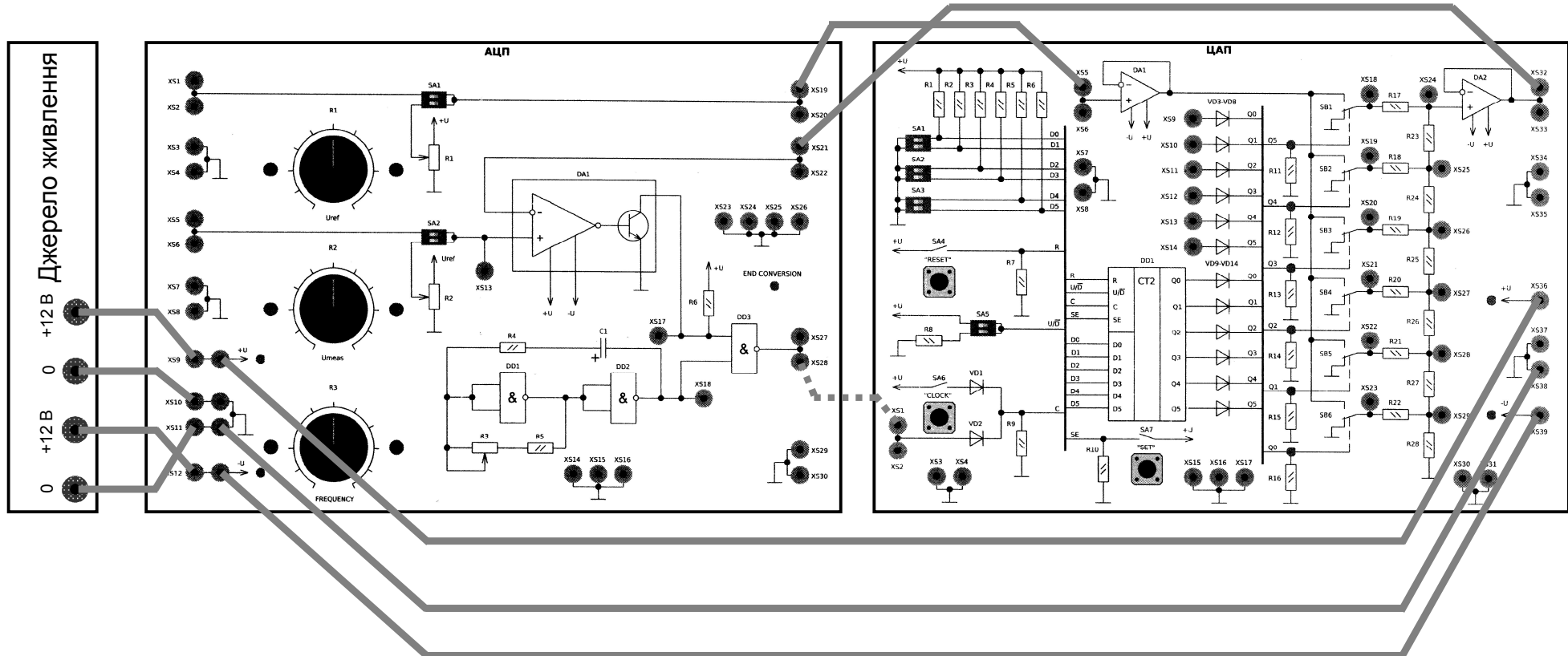


Рисунок 3.1 – Схема установки для проведення досліджень АЦП

4.3 Увімкнути джерело живлення панелей.

Увімкнути осцилограф.

Увімкнути вольтметр і мультиметр та задати режими вимірювання постійної напруги, встановити межу вимірювання 10 В.

4.4 За допомогою провідників, враховуючи полярність, підключити вольтметр до клем XS20 та XS26 панелі АЦП.

Резистором R1 панелі АЦП встановити значення опорної напруги ЦАП  $U_{ref} = 6,3$  В.

Визначити дискретність перетворення ЦАП

$$\Delta = U_{ref}/(2^n - 1) = 6,3/(2^6 - 1) = 0,1 \text{ В.}$$

4.5 Підключити вольтметр до клем XS33 та XS34 панелі ЦАП для вимірювання вихідної напруги ЦАП.

4.6 Дослідження роботи АЦП у статичному режимі

4.6.1 Підключити мультиметр до клем XS13 та XS14 панелі АЦП для вимірювання вхідної напруги АЦП.

4.6.2 Резистором R2 панелі АЦП встановлювати значення вхідної напруги АЦП  $U_{meas}$  згідно до таблиці 3.1.

Натискати кнопку SA4 «RESET» панелі ЦАП і, після засвічування світлодіода «END CONVERSION» панелі АЦП, за світінням світлодіодів Q0-Q5 фіксувати в таблиці 1 значення двійкового коду, що відповідає вхідній напрузі АЦП Відповідні показання вольтметра (вихідної напруги ЦАП ) записувати до таблиці 1.

Таблиця 3.1 – Результати дослідження роботи АЦП

Вхідна напруга АЦП, В	0,00	0,60	0,80	1,60	2,5	3,2	5,0	Опорна напруга $U_{ref} = 6,3$ В
Двійковий код на виході АЦП								
Десятковий код								
Напруга на виході ЦАП, В								

4.7 Дослідження роботи АЦП у динамічному режимі

4.7.1 Сигнальний кабель першого каналу осцилографа підімкнути до клем XS17 та XS15 панелі АЦП для спостереження сигналу дозволу перетворення АЦП.

4.7.2 Сигнальний кабель другого каналу осцилографа підімкнути замість вольтметра до клем XS33 та XS34 панелі ЦАП для спостереження сигналу з виходу ЦАП.

4.7.3 Встановити органи керування осцилографа так, щоб отримати зображення, наведене на рисунку 3.2 при натисканні кнопки SA4 «RESET»

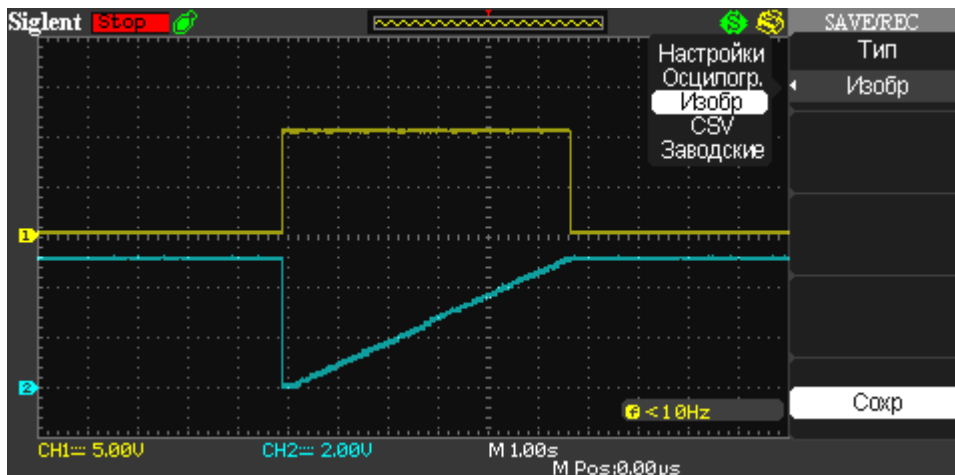


Рисунок 2 – Сигнали дозволу перетворення (канал 1)  
та з виходу ЦАП (канал 2)

панелі ЦАП. З рисунку видно, що при надходженні сигналу дозволу перетворення АЦП на виході ЦАП формується лінійно зростаюча (пилкоподібна) напруга. Зарисувати осцилограми.

4.7.1 Сигнальний кабель першого каналу осцилографа підімкнути до клем XS27 та XS15 панелі АЦП для спостереження імпульсів заповнення лічильника ЦАП.

4.7.3 Встановити органи керування осцилографа так, щоб отримати зображення, наведене на рисунку 3 при натисканні кнопки SA4 «RESET» панелі ЦАП. З рисунку видно, що при надходженні імпульсів мультивібратора на вхід лічильника на виході ЦАП формується лінійно зростаюча (пилкоподібна) напруга. Зарисувати осцилограми.

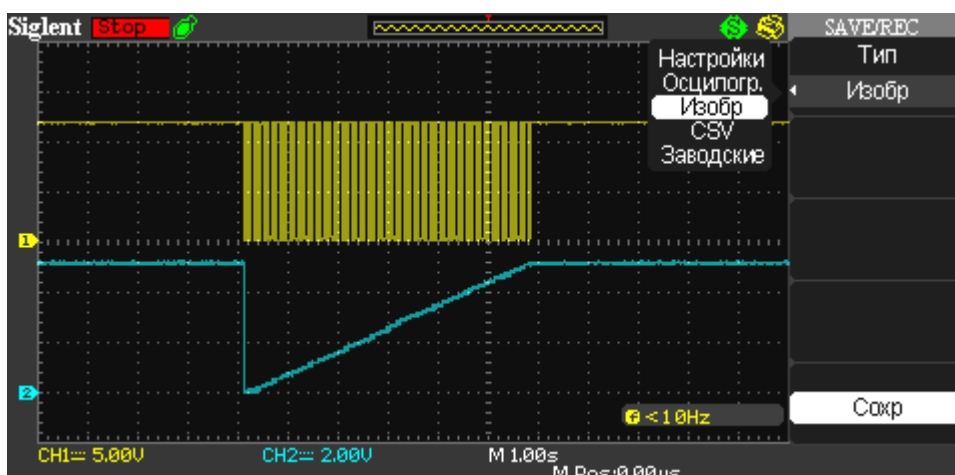


Рисунок 3 – Сигнали мультивібратора (канал 1)  
та з виходу ЦАП (канал 2)

4.8 Вимкнути прилади і живлення стенду лабораторного.  
Навести порядок на робочому місці.

## Обробка результатів експериментів

5.1 Перевести двійкові коди з виходу АЦП у десяткові і записати до таблиці 1.

Зробити висновок, наскільки значення коду відповідає вхідній напрузі АЦП, з урахуванням того, що дискретність перетворення ЦАП було задано рівною  $\Delta = 0,1$  В.

5.2 Співставити значення вхідної напруги АЦП і відповідні їм значення вихідної напруги ЦАП у таблиці 1.

Зробити висновок відносно точності перетворення.

## 6 Пояснення до роботи

Аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) знаходять широке застосування в різних областях науки і техніки. Вони є складовою частиною цифрових вимірювальних приладів, радіолокаційних систем, систем автоматичного керування, пристроїв введення-виведення інформації ЕОМ. Великі перспективи їх застосування в цифровому телебаченні й аудіосистемах.

Узагальнена структурна схема АЦП наведена на рисунку 4.

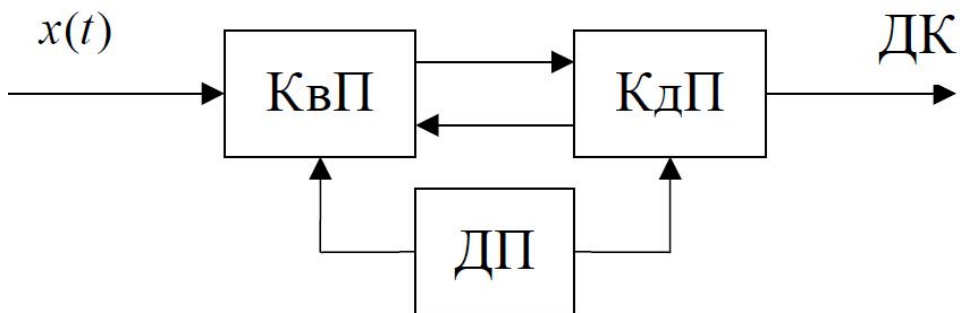


Рисунок 4 – Структурна схема АЦП

АЦП являє собою дискретизуючий пристрій ДП, що тактує роботу квантуючого КвП і декодує КдП пристроїв.

На вхід квантуючого пристрою надходить перетворений електричний сигнал (напруга чи струм)  $x(t)$ , а на виході кодуєчого пристрою отримуємо дискретний сигнал ДК у формі двійкового коду. У результаті квантування значення  $x(t)$  безперервного сигналу представляється у вигляді кінцевого числа  $n$  ступенів квантування  $\Delta x$ :

$$x_i = n \cdot \Delta x = x \pm \Delta K, \quad (1)$$

де  $\Delta K$  – похибка квантування, зумовлена тим, що перетворювана величина  $x$  може містити неціле число  $n$  ступенів квантування  $\Delta x$ .

Максимально можлива похибка квантування (похибка дискретності) визначається ступенем квантування, тобто

$$\Delta K_{\max} = \Delta x. \quad (2)$$

Для відомого діапазону  $x_{\max}$  максимально можливе число дискретних значень перетвореного сигналу  $x(t)$ , включаючи  $x = 0$  становить

$$n_{\max} = \frac{x_{\max}}{\Delta x + 1}. \quad (3)$$

При цьому похибка квантування не повинна перевищувати загальну похибку перетворення. Отже, якщо відоме значення припустимої відносної похибки перетворення  $\gamma_{\max}$ , то при визначенні ступеню квантування необхідно врахувати співвідношення

$$\Delta x \leq \left( \frac{\gamma}{100} \right) \cdot x_{\max}. \quad (4)$$

Реальний АЦП має визначений поріг чутливості  $x_{n.ч.}$ , тобто здатність викликати зміни вихідної інформації перетворювача при подачі на його вхід найменшого значення перетворюваного сигналу. Значення  $\Delta x$  повинне перевищувати значення  $x_{n.ч.}$  і задовольняти нерівності

$$x_{n.ч.} < \Delta x \leq \left( \frac{\gamma}{100} \right) \cdot x_{\max}. \quad (5)$$

Реалізація узагальненості структури АЦП може здійснюватися різними способами. Однак, незалежно від способу побудови АЦП, усі вони мають методичну похибку, зумовлену похибкою квантування  $\Delta x$ .

У залежності від області застосування АЦП, їх основні характеристики (точність, роздільна здатність, швидкодія) можуть істотно відрізнятися. Так при використанні АЦП у вимірвальних пристроях головним є точність перетворення, а швидкодія обмежується реальною швидкістю реєстрації результату виміру. У пристроях введення-виведення ЕОМ чи мікропроцесорних системах потрібна більш висока швидкодія і роздільна здатність.

Застосування АЦП у різних областях техніки стало передумовою створення різних структур АЦП, кожна з яких дозволяє вирішувати визначене коло задач, що постають перед АЦП у кожному конкретному випадку. З усього різноманіття існуючих методів аналого-цифрового перетворення в інтегральній технології знайшли застосування три з них:

1) метод рівнобіжного перетворення, що має високу швидкодію, але малу роздільну здатність (6 розрядів) та високу вартість;

2) метод послідовного наближення, що має швидкодію близько 100 мкс за розрядності – 10...12;

3) метод інтегрування, що має високу точність, роздільну здатність, завадозахищеність, але низьку швидкодію.

У мікропроцесорній техніці найбільше поширення одержав метод послідовних наближень, що забезпечує найкраще співвідношення між швидкодією і вартістю АЦП.

Для прикладу, розглянемо більш докладно 10-розрядний АЦП типу К1113ПВ1, функціональна схема, якого наведена на рисунку 5.

Вона складається з компаратора 3, цифро-аналогового перетворювача ЦАП з джерелом опорної напруги ДОН і пристрою керування. Пристрій керування, у свою чергу, складається з 10-розрядного регістра *RG*, тригерів *T31-T40*, логічних елементів *I11-I20* та *АБО21-АБО29*.

Суть цього методу полягає у послідовному порівнянні перетвореної напруги  $U_x$  з напругою на виході зразкового ЦАП, що керується регістром послідовного наближення *T31-T40*. При запуску пристрою цей регістр встановлюється генератором *GI* у вихідний стан. При цьому на виході ЦАП формується напруга, що відповідає половині діапазону перетворення. Це забезпечується вмиканням його старшого розряду 1000000000. Якщо при цьому напруга на виході ЦАП менша за  $U_x$ , то старший розряд вимикається і вмикається менший за старшинством 0100000000, що відповідає формуванню на виході ЦАП напруги, яка дорівнює половині попередньої.

У випадку, якщо  $U_x$  перевищує цю напругу, то додатково вмикається наступний менший розряд. На вході ЦАП маємо код 0110000000, що приводить до збільшення вихідної напруги ЦАП у 1,5 рази. Вона знову порівнюється компаратором 3 із напругою  $U_x$  і т.д.

Описана процедура повторюється *m* разів (*m* – число розрядів АЦП).

Так на виході ЦАП формується напруга, що відрізняється від вхідної  $U_x$  не більш ніж на одиницю молодшого розряду.

Результатом перетворення вхідної напруги  $U_x$  в її цифровий еквівалент є двійковий код  $N_x$ .

Похибка і час перетворення визначаються в основному параметрами ЦАП (роздільною здатністю, лінійністю, швидкодією) і компаратора 3 (порогом чутливості, швидкодією).

По закінченні перетворення АЦП видає команду «Готовність даних».

Пуск АЦП (запуск процесу перетворення) здійснюється за допомогою кнопки *SA1* «Запуск».

Перевагою розглянутого АЦП є можливість побудови багаторозрядних систем порівняно високої швидкодії.

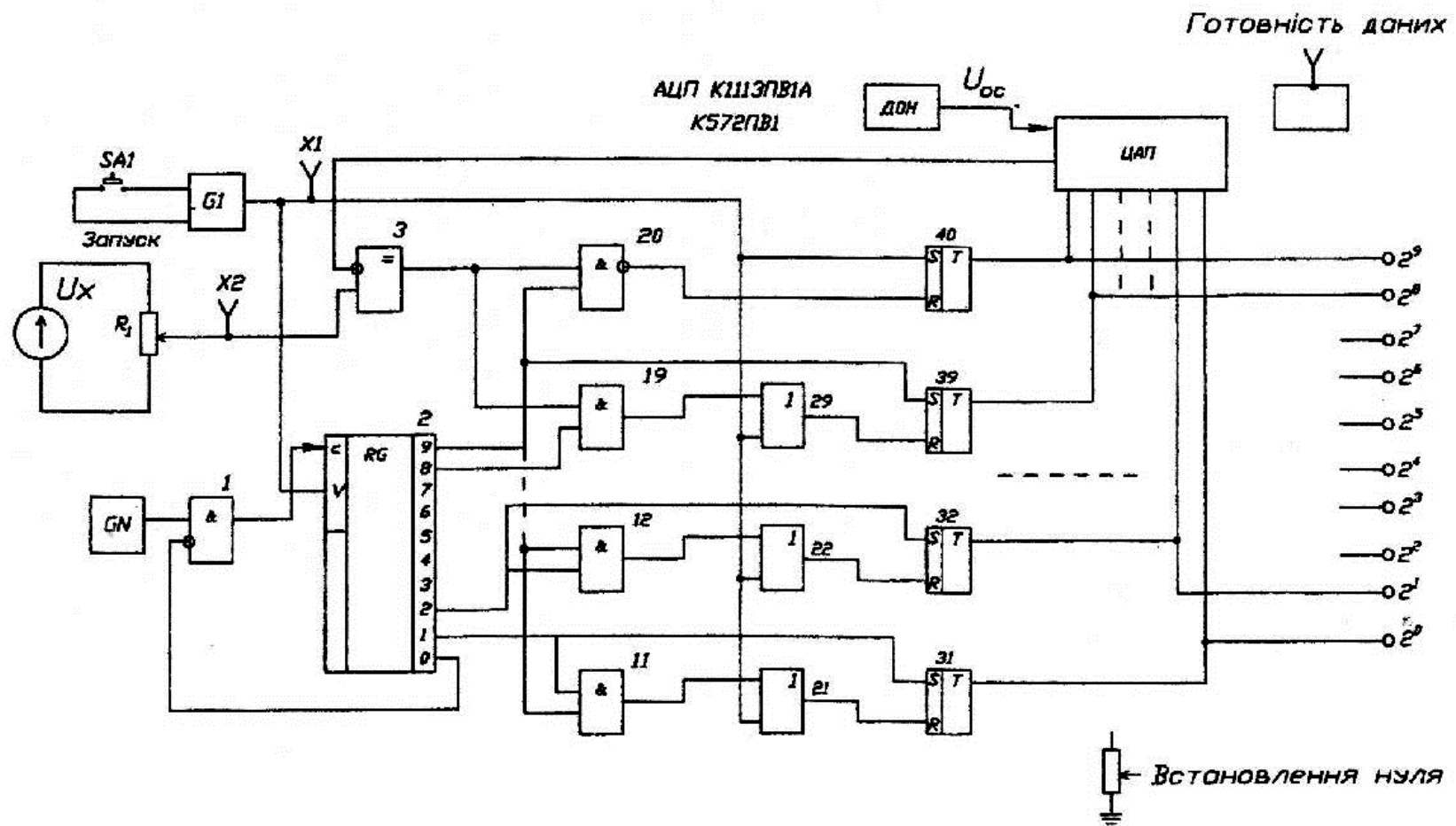


Рисунок 5 – АЦП послідовного наближення

### *Контрольні запитання*

- 1. Сформулюйте, що називається аналого-цифровим перетворювачем.*
- 2. Назвіть області застосування АЦП.*
- 3. Вкажіть основні характеристики АЦП.*
- 4. Наведіть структурну схему АЦП.*
- 5. Назвіть найбільш поширені методи аналого-цифрового перетворення в інтегральній технології.*
- 6. Викладіть суть методу послідовних наближень.*

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Розд. 8.7.2).

## Лабораторна робота № 6

### ДОСЛІДЖЕННЯ ОДНОФАЗНИХ ВИПРЯМЛЯЧІВ

#### 1 Мета роботи

- 1) Дослідження однофазних схем випрямлення.
- 2) Дослідження однофазних випрямлячів з пасивними фільтрами і компенсаційним стабілізатором.
- 3) Дослідження однофазного керованого випрямляча.

#### 2 Обладнання

- 1) Стенд лабораторний № 5, 6.
- 2) Осцилограф С1-93 (С1-83).

#### 3 Зміст роботи

- 1) Дослідити роботу однопівперіодної і мостової однофазних схем випрямлення при роботі на активне навантаження.
- 2) Дослідити роботу однопівперіодного і мостового однофазних випрямлячів з ємнісним, індуктивним, індуктивно-ємнісними Г-подібним і П-подібним фільтрами та з компенсаційним стабілізатором.
- 3) Дослідити роботу однофазного керованого випрямляча з нульовим виводом.

#### 4 Порядок виконання роботи

- 4.1 Ознайомитись з робочим місцем устаткуванням і приладами.
- 4.2 Ввімкнути осцилограф та живлення стенда лабораторного. Тумблер у середній частині лицьової панелі стенда (між мнемосхемами) встановити у праве положення.
- 4.3 Дослідження однопівперіодної і мостової схем випрямлення при роботі на активне навантаження
  - 4.3.1 Дослідження виконувати за допомогою схеми, наведеної на рисунку 6.1 (верхня мнемосхема на правій половині лицьової панелі стенда лабораторного).

Перемикач *Рег. выпр.* встановити у ненатиснуте положення.
  - 4.3.2 Зібрати однопівперіодну схему випрямлення, для чого перемикачі встановити у такі положення: *SA1* – у ненатиснуте, *SA2* – в натиснуте, *SA3 - SA5* – у ненатиснуте.

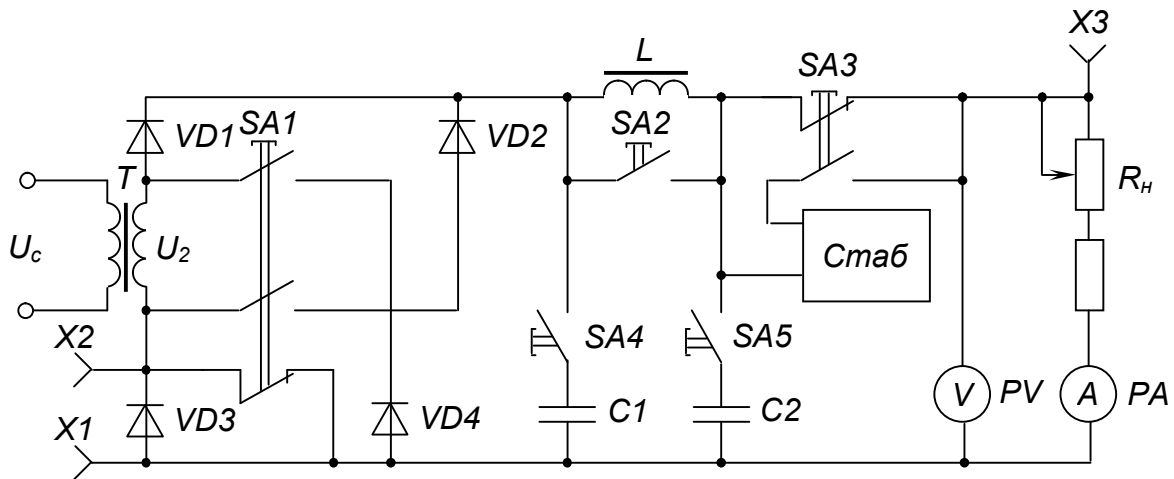


Рисунок 6.1 - Схема для дослідження однофазних некерованих випрямлячів

4.3.3 Замалювати осцилограму напруги на навантаженні однопівперіодного випрямляча, для чого кабель першого каналу осцилографа підімкнути нульовим проводом до клемми  $X1$ , а сигнальним до клемми  $X3$ .

Замалювати осцилограму напруги на вентилі (діоді) однопівперіодного випрямляча, для чого кабель першого каналу осцилографа підімкнути нульовим проводом до клемми  $X2$ , а сигнальним до клемми  $X1$ .

При виконанні дослідів органи керування осцилографа встановлювати у положення, що забезпечують спостереження стійкого, зручного для вимірів зображення.

4.3.4 Зібрати мостову схему випрямлення, для чого перемикач  $SA1$  встановити у натиснуте положення, а інші перемикачі – згідно з пп. 4.3.2.

4.3.5 Замалювати осцилограми напруг на навантаженні і діоді мостового випрямляча, використовуючи методику, викладену в пп. 4.3.3.

4.4 Дослідження однопівперіодного і мостового випрямлячів з різними типами фільтрів та з стабілізатором

4.4.1 Зняти залежність вихідної напруги однопівперіодного і мостового випрямлячів від струму навантаження для різних типів фільтрів і з стабілізатором (зовнішні характеристики), для чого:

1) значення струму навантаження задавати резистором  $R_n$  за амперметром  $PA$ , встановленим на лицьовій панелі стенда лабораторного;

2) значення вихідної напруги фіксувати за вольтметром  $PV$ , встановленим на лицьовій панелі;

3) перемикачі  $SA1-SA5$  встановлювати згідно з таблиці 6.1;

4) результати занести у таблицю 6.2.

Зняти осцилограми напруги на навантаженні однопівперіодного і мостового випрямлячів з ємнісним та індуктивним фільтрами, а також мостового випрямляча з П-подібним  $CLC$ -фільтром і з  $CLC$ -фільтром та стабілізатором. Для цього кабель першого каналу осцилографа нульовим проводом підімкнути до клемми  $X1$ , а сигнальним до  $X3$ . Тип фільтра задавати установкою перемикачів згідно таблицю 6.1.

Таблиця 6.1 – Положення перемикачів при дослідженнях

Тип випрямляча	Положення перемикачів					Тип фільтра
	SA1	SA2	SA3	SA4	SA5	
однопівперіодний		X				без фільтра
		X		X	X	C
						L
					X	LC
				X	X	CLC
МОСТОВИЙ	X	X				без фільтра
	X	X		X	X	C
	X					L
	X				X	LC
	X			X	X	CLC
МОСТОВИЙ з стабілізатором	X		X	X	X	CLC

- Примітки. 1. У таблиці 6.1 знак “X” відповідає натиснутому положенню перемикача.  
 2. У таблиці 6.2 позиції, що відповідають значенням струму навантаження, які не можуть бути встановлені за допомогою резистора  $R_n$ , не заповнювати.

Таблиця 6.2 – Результати зняття зовнішніх характеристик

$I_n, A$		0,1	0,15	0,2	0,3	0,35	0,4	0,5	0,6	Тип випрямляча
$U_d, B$	Тип фільтра	без фільтра								однопівперіодний
		C								
		L								
		LC								
		CLC								
	Тип фільтра	без фільтра								МОСТОВИЙ
		C								
		L								
		LC								
		CLC								
		CLC								МОСТОВИЙ з стабілізатором

\*) Строки, помічені цим знаком, заповнюються при виконанні завдання пп. 4.5.3.

4.6 Вимкнути живлення осцилографа і стенда лабораторного.  
 Навести порядок на робочому місці.

## 5 Обробка результатів експериментів

5.1 У звіті про лабораторну роботу осцилограми розташовувати одну під одною з урахуванням орієнтації відносно осцилограми напруги на вторинній обмотці трансформатора.

За осцилограмами з пп. 4.3.3 та пп. 4.3.5 зробити висновки щодо характеру вихідної напруги досліджуваних схем випрямлення і значень зворотної напруги на діодах.

5.2 За даними таблиці 6.2 у одній системі координат побудувати зовнішні характеристики однопівперіодного і мостового випрямлячів для різних типів фільтрів та мостового випрямляча з стабілізатором.

Аналізуючи побудовані характеристики, зробити висновки про вплив на значення вихідної напруги випрямляча:

- 1) схеми випрямлення (типу вентильної схеми);
- 2) ємнісного фільтра;
- 3) індуктивного фільтра;
- 4) наявності у складі випрямляча стабілізатора.

5.3 За осцилограмами пп. 4.4.2 визначити розмах пульсацій напруги для кожного випадку і зробити висновки про вплив типу фільтра на характер пульсацій і про вплив стабілізатора на їхнє значення.

## 6 Пояснення до роботи

### 5.1 Випрямлячі

Електрична енергія централізовано, в основному, виробляється на змінному струмі.

В той же час споживання електричної енергії, за винятком теплових та освітлювальних установок, двигунів змінного струму та деяких інших застосувань, як правило, відбувається на постійному струмі: електричні двигуни постійного струму, технологічні процеси (наприклад, електроліз, зварювання), живлення електронних пристроїв (наприклад, вимірювальних, підсилюючих, обчислювальних, керуючих і т.п.).

Виходячи з цього, одним з основних видів перетворення електричної енергії є випрямлення.

Випрямлячем називають електротехнічний пристрій, призначений для перетворення енергії джерела напруги змінного струму в енергію напруги постійного струму.

Випрямляч зазвичай містить трансформатор, вентильну схему, згладжуючий фільтр, регулятор (стабілізатор). Навантаження також відносять до складу випрямляча, оскільки воно суттєво впливає на його роботу.

Трансформатор здійснює перетворення напруги мережі до необхідного для роботи випрямляча значення і забезпечує електричне (гальванічне) розділення первинного і вторинного кіл. Останнє забезпечує умови електричної безпеки за живлення.

Вентильна схема перетворює змінну напругу на випрямлену – в однополярну пульсуючу.

Згладжуючий фільтр виділяє з однополярної пульсуючої напруги постійну складову, чим забезпечує отримання власне напруги постійного струму.

Регулятор (стабілізатор) призначений для завдання на навантаженні необхідного значення напруги або його зміни за необхідним законом (наприклад, підтримки напруги на навантаженні на незмінному рівні) при змінах напруги мережі або змінах опору навантаження у заданих межах.

## 5.2 Однофазні схеми випрямлення

При потужності споживачів до декількох сотень ват випрямлення здійснюють за допомогою однофазних схем: однопівперіодної і двопівперіодних – з нульовим виводом і мостової.

Однопівперіодна схема і часові діаграми, що ілюструють її роботу, наведені на рисунку 6.3.

Часові діаграми тут і надалі, як правило показують залежність відповідної величини від

$$\vartheta = \omega t, \quad (6.1)$$

де  $\omega = 2\pi f_M$  – кругова частота;

$f_M$  – частота мережі живлення;

$t$  – час.

Струм у схемі протікає тільки при полярності напруги  $U_2$ , зазначеної без дужок, коли діод  $VD$  відкритий. При протилежній полярності діод закритий, і вся напруга прикладається до нього.

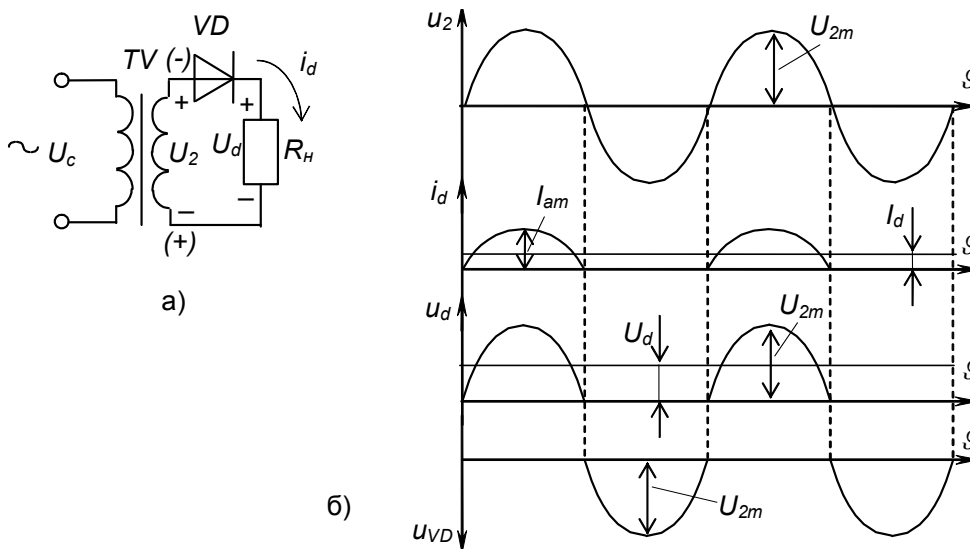


Рисунок 6.3 – Однофазний однопівперіодний випрямляч (а) і часові діаграми його роботи (б)

Двопівперіодна схема випрямляча з нульовим виводом та часові діаграми його роботи наведені на рисунку 6.4.

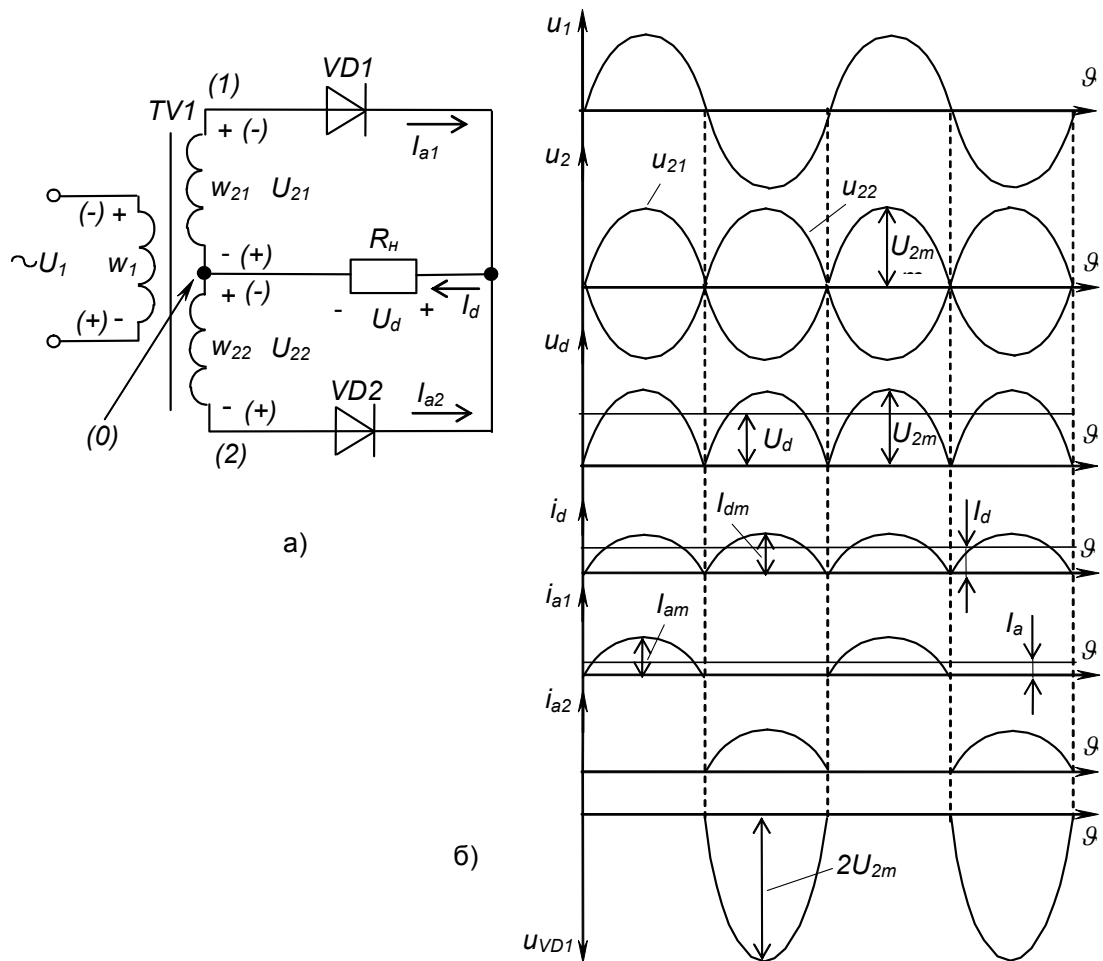


Рисунок 6.4 – Однофазний випрямляч з нульовим виводом (а) і часові діаграми його роботи (б)

Дана схема фактично являє собою об'єднання двох однопівперіодних схем випрямлення, одна з яких пропускає струм у навантаження при позитивній півхвилі напруги  $U_{21}$ , а інша – при негативній півхвилі напруги  $U_{22}$ . Оскільки число витків півобмоток однакове, то  $U_{21} = U_{22}$ . При цьому напрямок струму в навантаженні у обох випадках однаковий, а отже полярність пульсуючої напруги також однакова.

Максимальна зворотна напруга на закритому діоді дорівнює сумі амплітуд напруг  $U_{21}$  і  $U_{22}$ , тобто подвійній амплітуді напруги півобмотки трансформатора, оскільки коли один діод відкритий, а інший закритий, то останній виявляється підімкненим до двох півобмоток трансформатора.

Двопівперіодна мостова схема і часові діаграми, що пояснюють її роботу, наведені на рисунку 6.5

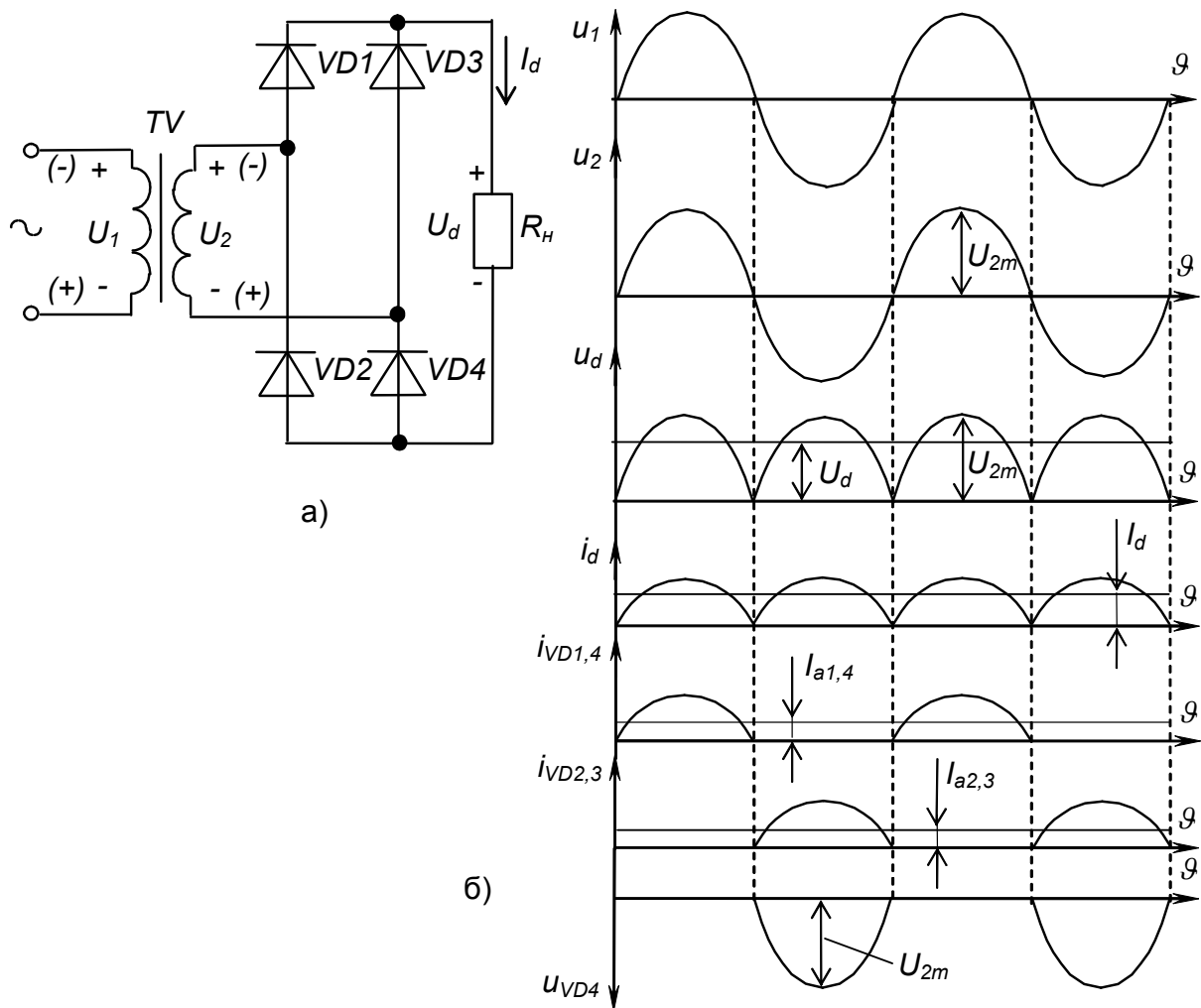


Рисунок 6.5 – Однофазний мостовий випрямляч (а)  
і часові діаграми його роботи (б)

У цій схемі до однієї діагоналі утвореного діодами моста – діагоналі змінного струму – підімкнено вторинну обмотку трансформатора, а до іншої – діагоналі постійного струму – навантаження. Діоди  $VD1$  і  $VD3$  складають катодну групу, а  $VD2$  і  $VD4$  – анодну (за ознакою з'єднання разом однакових електродів).

За позитивної півхвилі напруги  $U_2$  (полярність зазначена без дужок) струм протікає через діоди  $VD1$  і  $VD4$ . До діодів  $VD2$  і  $VD3$  у цей час прикладена зворотна напруга, амплітудне значення якої дорівнює  $U_{2m}$ , тому що закритий діод (наприклад,  $VD2$ ) через діод, що проводить струм ( $VD4$ ), підмикається паралельно до вторинної обмотки трансформатора. За негативної півхвилі (полярність зазначена у дужках) струм проводять діоди

$VD2$  і  $VD3$ , тобто у провідному стані в мостовому випрямлячі завжди знаходяться два діоди – один катодної групи і один анодної.

Основні показники однофазних схем випрямлення наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Основні показники однофазних схем випрямлення

Параметр		Схема випрямлення		
		однопів-періодна	двопів-періодна з нульовим виводом	двопів-періодна мостова
Відношення діючого значення напруги вторинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленої напруги	$\frac{U_2}{U_d}$	2,22	1,11	1,11
Відношення діючого значення струму вторинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленого струму	$\frac{I_2}{I_d}$	1,57	0,785	1,11
Відношення середнього значення струму діода до середнього значення випрямленого струму	$\frac{I_a}{I_d}$	1,57	0,5	0,5
Відношення діючого значення струму первинної обмотки трансформатора до середнього значення випрямленого струму ( $n$ - коефіцієнт трансформації)	$\frac{I_1}{nI_d}$	1,21	1,11	1,11
Частота основної гармоніки пульсацій	$f_{(1)}$	$f_m$	$2f_m$	$2f_m$
Коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги	$K_{n(1)}$	1,57	0,667	0,667
Габаритна потужність трансформатора	$S_T$	3,1	1,48	1,23
Наявність підмагнічування	–	є	немає	немає

Порівняльний аналіз однофазних схем випрямлення показує:

1) однопівперіодна схема, у зв'язку з підвищеною габаритною потужністю трансформатора (бо його осердя підмагнічується через протікання струму у вторинній обмотці в одному напрямку протягом періоду) і значним коефіцієнтом пульсацій, застосовується тільки для живлення навантажень малої потужності – десятки міліват;

2) схема з нульовим виводом має кращі параметри вихідної напруги і два діоди, але трансформатор повинен мати вторинну обмотку, що складається з двох однакових півобмоток, і на закритий діод діє подвійна зворотна напруга;

3) мостова схема, що має чотири діоди і трансформатор з однією вторинною обмоткою, забезпечує ті ж параметри вихідної напруги, що й схема з нульовим виводом (оскільки габарити і вартість діодів невеликі, їхня подвоєна кількість не є істотним недоліком, окрім випадків випрямлення малих значень напруг – одиниці вольт, – коли істотно проявляється дія прямого падіння напруги на діодах).

### 5.3 Згладжуючі фільтри

Згладжуючий фільтр застосовується для згладжування пульсацій випрямленої напруги до рівня, необхідного для нормальної роботи навантаження.

При цьому коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги визначається як відношення амплітуди основної гармоніки пульсацій  $U_{m(1)}$  до значення постійної складової

$$K_{n(1)} = \frac{U_{m(1)}}{U_d} . \quad (6.2)$$

Якість фільтра характеризується коефіцієнтом згладжування, що дорівнює відношенню коефіцієнта пульсацій на вході фільтра  $K_{n(1)вх}$  до коефіцієнта пульсацій на його виході  $K_{n(1)вих}$ :

$$K_{зг} = \frac{K_{n(1)вх}}{K_{n(1)вих}} . \quad (6.3)$$

Фільтри бувають пасивними (виконуються на пасивних елементах – резисторах, конденсаторах, дроселях) і активними (на транзисторах, операційних підсилювачах).

Пасивні фільтри використовують здатність індуктивностей і ємностей накопичувати енергію відповідно електричного та електромагнітного полів.

Індуктивні фільтри застосовуються у випрямлячах середньої і великої потужності, тому що забезпечують безперервність струму в схемі: у навантаженні, трансформаторі, діодах (бо відповідно до першого закону комутації струм у індуктивності не може змінюватися стрибком).

Схема індуктивного фільтра і часові діаграми його роботи при фільтрації двопівперіодної напруги наведені на рисунку 6.6.

Ефект фільтрації визначається тим, що індуктивність чинить опір гармонічним складовим пульсуючої випрямленої напруги, а постійній складовій – ні. Дросель і активний опір навантаження утворюють частотнозалежний дільник напруги за умови, що опір дроселя змінній складовій пульсуючого струму з найнижчою частотою  $X_L = \omega_n L$  (активний опір у ідеального дроселя відсутній) значно перевищує активний опір навантаження  $R_n$ . Змінні складові напруги діляться між  $R_n$  і  $X_L$  так, що в основному падають на  $X_L$ , а постійна складова вся прикладається до  $R_n$ .

Отже для ефективного згладжування необхідним є виконання умови:

$$X_L = \omega_n L \gg R_n , \quad (6.4)$$

де  $\omega_n = 2\pi f_n$ .

У якості індуктивності в випрямлячах використовують дроселі – котушки індуктивності з магнітним осердям, що має повітряний зазор, який запобігає насиченню магнітопроводу.

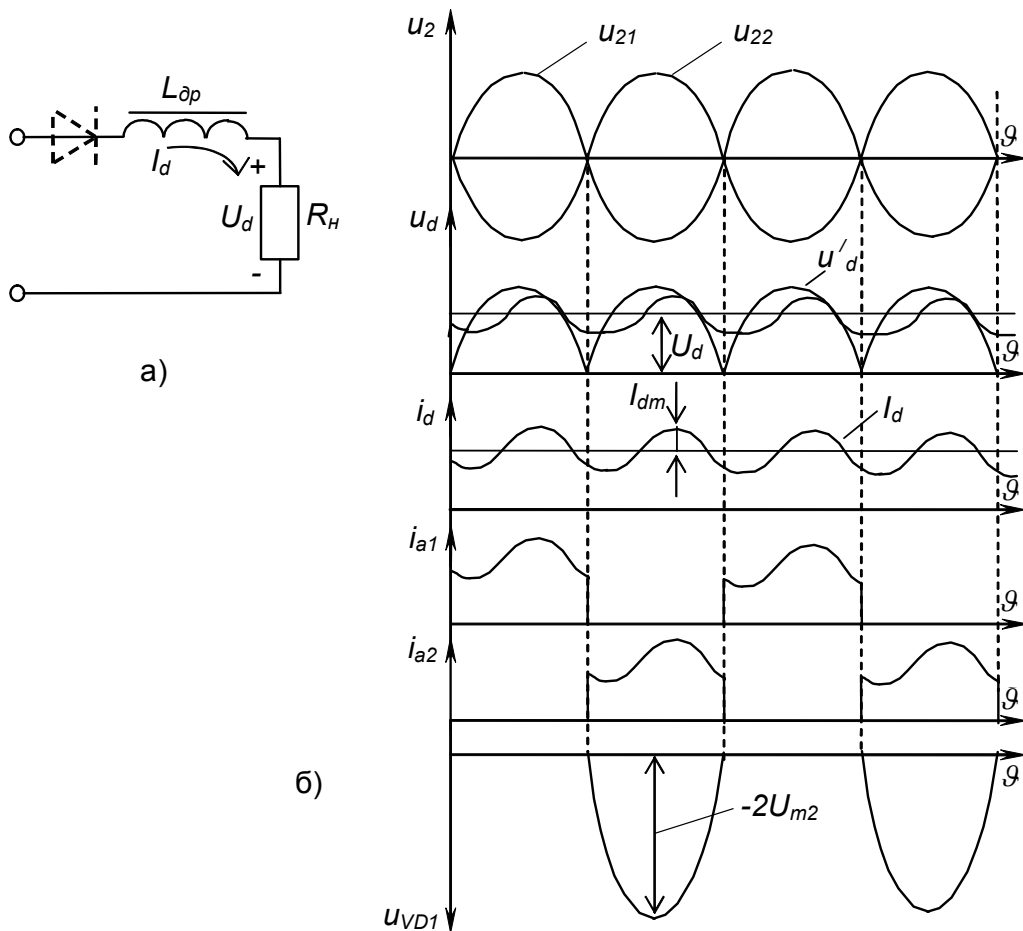


Рисунок 6.6 – Індуктивний фільтр (а) і часові діаграми роботи (б) однофазного двопівперіодного випрямляча з індуктивним фільтром (з активно-індуктивним навантаженням)

Ємнісний фільтр – це конденсатор, що вмикається паралельно навантаженню. Його схема і часові діаграми роботи наведені на рисунку 6.7.

За умови, що опір конденсатора  $X_C$  для складової пульсуючого струму з найнижчою частотою значно менший за опір навантаження  $R_H$ , забезпечується шунтування навантаження за змінним струмом: оскільки конденсатор і активний опір навантаження утворюють частотнозалежний дільник струму, постійний струм увесь протікає через  $R_H$  (конденсатор постійного струму не проводить), а змінні складові розподіляються між  $R_H$  і  $X_C$ . Для ефективного згладжування необхідним є виконання умови:

$$X_C = \frac{1}{\omega_n C} \ll R_H . \quad (6.5)$$

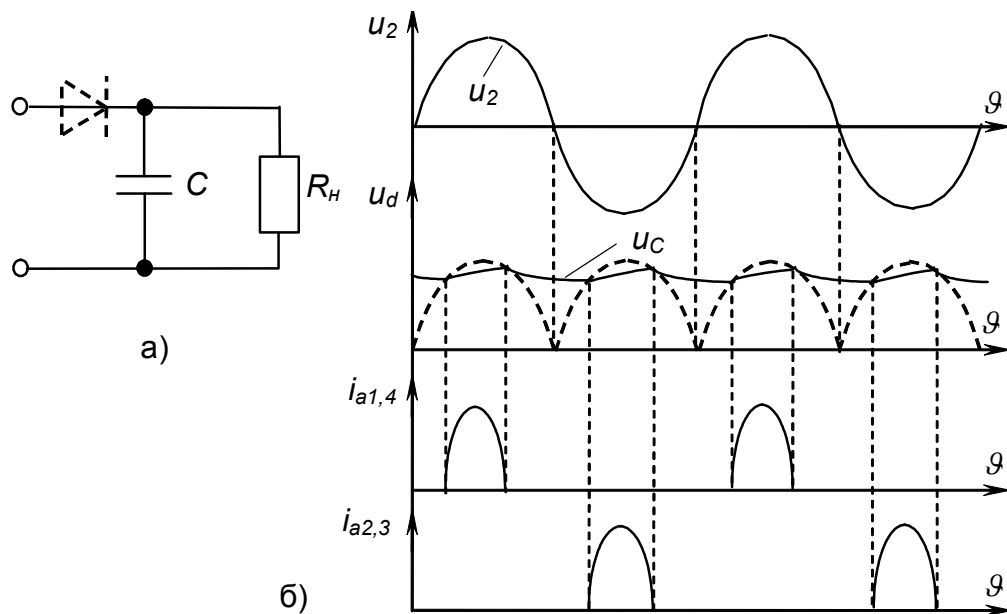


Рисунок 6.7 – Ємнісний фільтр (а) і часові діаграми роботи (б) мостового випрямляча з ємнісним фільтром (з активно-ємнісним навантаженням)

Заряд конденсатора відбувається у проміжки часу, коли напруга вторинної обмотки перевищує напругу на конденсаторі (протікає струм через відповідні вентиля). Якщо вона нижче, то навантаження живиться енергією, що запасена в ємності (конденсатор розряджається).

Струм заряду, значення якого обмежується лише опором елементів схеми випрямлення, має пульсуючий характер, що несприятливо як для діодів і трансформатора, так і для мережі живлення. Тому ємнісні фільтри застосовуються при малих струмах навантаження. Іноді, щоб обмежити кидки струму, у коло заряду включають опір  $R = (0,2 - 0,3)R_n$ .

Слід також зазначити, що чим більша постійна часу розряду конденсатора  $\tau = CR_n$ , тим вище середнє значення випрямленої напруги, що наближається до величини  $U_{dXX} = \sqrt{2}U_2$ .

Для підвищення якості фільтрації і поліпшення умов роботи випрямляча застосовують Г-подібні LC-фільтри, що виконуються за схемою, зображеною на рисунку 6.8,а.

Тут конденсатор знижує опір навантаження за змінним струмом, а індуктивність, окрім фільтрації, забезпечує і безперервність струму.

Для одержання кращого згладжування випрямленої напруги при забезпеченні прийнятних значень параметрів елементів фільтра застосовують багатоланкові фільтри, що являють собою послідовне вмикання простих фільтрів (ланок). Коефіцієнт згладжування багатоланкового фільтра дорівнює добутку коефіцієнтів згладжування ланок. Прикладом багатоланкового фільтра може бути П-подібний CLC-фільтр, зображений на рисунку 6.8,б. Він являє собою послідовне вмикання ємнісного фільтра і Г-подібного LC-фільтра.

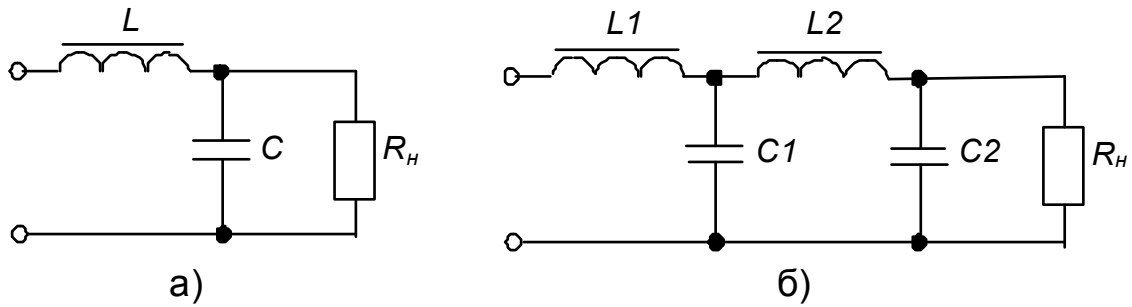


Рисунок 6.8 – Г-подібні LC-фільтри: одноланковий (а) і дволанковий (б)

Для забезпечення високих масогабаритних показників за малої потужності застосовують активні фільтри, у яких дія реактивних елементів посилюється транзисторними або операційними підсилювачами.

#### 5.4. Компенсаційний стабілізатор напруги

Стабілізатори призначені для підтримання значення напруги на навантаженні випрямляча на незмінному рівні при змінах напруги мережі, опору навантаження у заданих межах і дії інших дестабілізуючих факторів.

Стабілізатори поділяються на параметричні, де використовується ефект незмінності напруги в деяких видах електронних приладів при зміні струму, що протікає через них, (наприклад, стабілітрон), і компенсаційні, у яких стабілізація забезпечується за рахунок замкненої автоматичної системи регулювання з негативним зворотним зв'язком, коли, наприклад, опір керованого нелінійного елемента, включеного послідовно або паралельно навантаженню, змінюється за допомогою спеціальної схеми слідкування.

Частіше застосовуються послідовні стабілізатори, як більш економічні. Структурна схема такого стабілізатора зображена на рисунку 6.9.

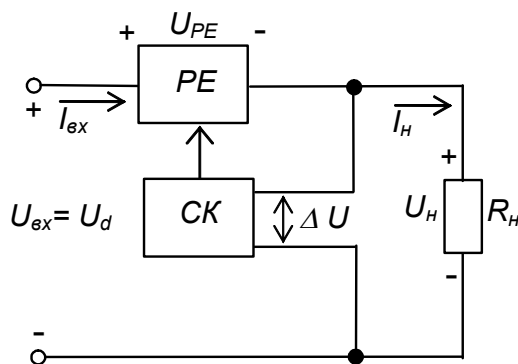


Рисунок 6.9 – Структурна схема компенсаційного стабілізатора послідовного типу

Тут струм навантаження  $I_n$  дорівнює струму регулюючого елемента  $PE$ , а напруга на навантаженні  $U_n$  дорівнює різниці напруги  $U_d$  і падіння напруги на  $PE$   $U_{PE}$ . Завдяки зміні системою керування СК значення  $U_{PE}$  підтримується сталість  $U_n$ :

$$U_n = U_d - U_{PE}. \quad (6.6)$$

Ефективність роботи стабілізатора визначається коефіцієнтом стабілізації, що дорівнює відношенню відносної зміни напруги на вході стабілізатора до відносної зміни напруги на його виході:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_d}{U_d} : \frac{\Delta U_n}{U_n}, \quad (6.7)$$

де  $\Delta U_d$  і  $\Delta U_n$  – абсолютні зміни вхідної і вихідної напруг відповідно.  
 Одна з можливих схем компенсаційного стабілізатора наведена на  
 рисунку 6.10.

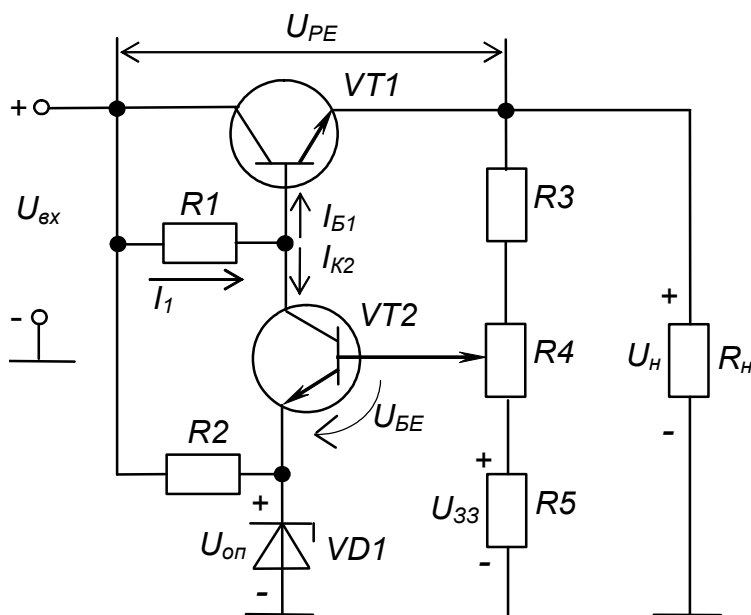


Рисунок 6.10 – Компенсаційний стабілізатор послідовного типу з регульованою вихідною напругою

У якості  $PE$  тут використано біполярний транзистор  $VT1$ , увімкнений за схемою з СК із зміщенням фіксованим струмом через резистор  $R_1$ .

Елементи  $R_2$  і  $VD1$ , що являють собою параметричний стабілізатор, є джерелом опорної (еталонної) напруги  $U_{оп}$ .

Резистори  $R_3 - R_5$  утворюють ділянку вихідної напруги, що є джерелом напруги зворотного зв'язку  $U_{зз}$ .

Транзистор  $VT2$  є пристроєм порівняння і підсилювачем сигналу неузгодженості, що дорівнює різниці напруг  $U_{зз}$  і  $U_{оп}$ .

Працює стабілізатор наступним чином.

Наприклад, при збільшенні  $U_d = U_{вх}$  починає збільшуватися  $U_n$ , а виходить, і  $U_{зз}$ . Це призводить до збільшення напруги розузгодження

$$U_{БЕ} = U_{зз} - U_{оп} , \quad (6.8)$$

транзистора, що є керуючим для,  $VT2$ . Через це  $VT2$  сильніше відкривається, збільшується його колекторний струм  $I_{К2}$  і більша частина струму  $I_1$ , що тече через резистор  $R_1$ , відгалужується у  $VT2$ . Струм бази транзистора  $VT1$

$$I_B = I - I_K \quad (6.9)$$

зменшується і транзистор  $V_{T1}$  прикривається, тобто падіння напруги на ньому  $U_{KE} = U_{PE}$  збільшується. У результаті, напруга на навантаженні згідно з (6.6) наближається до попереднього значення.

При зменшенні  $U_d$  відбуваються зворотні процеси, що також змушує  $U_n$  повернутися до попереднього значення.

Напруга на навантаженні визначається значенням еталонної напруги  $U_{on}$  і може регулюватися зміною напруги  $U_{33}$  при використанні, наприклад, у якості  $R_4$  резистора змінного опору.

У наш час широко поширені стабілізатори у інтегральному виконанні. Крім елементів, що забезпечують стабільність вихідної напруги, вони містять також елементи захисту від перевантаження, короткого замикання та перегріву корпусу.

### 5.5 Зовнішня (навантажувальна) характеристика випрямляча

Через наявність опору обмоток трансформатора  $R'_T$  (у розрахунках приводиться до вторинної сторони), опору провідників, що з'єднують елементи,  $R_{np}$  і опору діодів  $R_D$  вихідна напруга випрямляча знижується зі збільшенням струму навантаження.

Це відображає зовнішня характеристика випрямляча:

$$U_d = U_{dXX} - I_d (R'_T + R_{np} + R_D) , \quad (6.10)$$

де  $U_{dXX}$  – середнє значення випрямленої напруги у режимі холостого ходу;

$I_d$  – середнє значення струму навантаження.

Зовнішні характеристики випрямлячів різного типу наведено на рисунку 6.11.

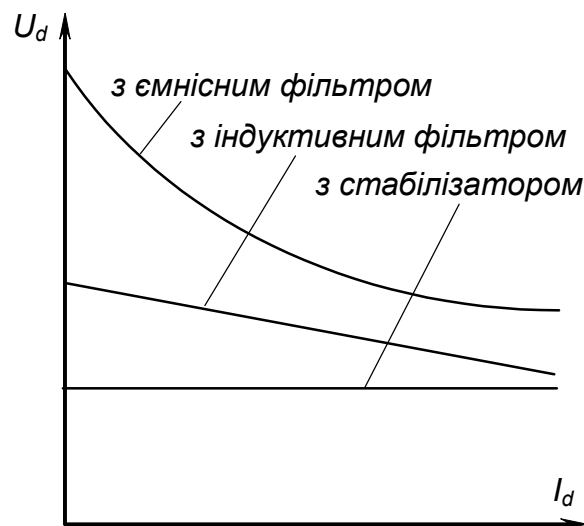


Рисунок 6.11 – Зовнішні характеристики випрямлячів

### Контрольні запитання

1. Вкажіть призначення і склад випрямляча.
2. Назвіть схеми випрямлення, що досліджуються у даній роботі, і поясніть принцип дії кожної з них.
3. Проведіть порівняльний аналіз однофазних схем випрямлення.
4. Вкажіть призначення, основні параметри й види згладжуючих фільтрів.
5. Наведіть схему і поясніть принцип дії індуктивного фільтра.
6. Наведіть схему і поясніть принцип дії ємнісного фільтра.
7. Наведіть схему і поясніть принцип дії Г-подібного LC-фільтра.
8. Вкажіть призначення стабілізаторів напруги і поясніть принцип роботи параметричного і компенсаційного стабілізаторів.
9. Наведіть схему компенсаційного стабілізатора напруги і поясніть принцип його дії.
10. Поясніть, що показує зовнішня характеристика випрямляча і як впливає на її вид склад випрямляча?

### РЕКОМЕНДОВАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Колонтаєвський Ю. П. Електроніка і мікросхемотехніка : підручник для студентів вузів / Ю. П. Колонтаєвський, А. Г. Сосков ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А. Г. Соскова. – [2-ге вид.]. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с. (Пп. 2.6, пп. 9.1–9.4, пп. 9.6–9.9, пп. 9.10.1).
2. Руденко В. С. Основы промышленной электроники : учебник / В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Київ : Вища школа, 1985. – 400 с. (С. 274–281, 293).
3. Забродин Ю. С. Промышленная электроника : учебник для вузов / Ю. С. Забродин. – Москва : Высш. Школа, 1982. – 496 с. – С. 287–314.
4. Горбачов Г. И. Промышленная электроника : учебник для вузов / Г. И. Горбачов, Е. Е. Чаплыгин. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (С. 189–210, 215–218).
5. Красько А. С. Промышленная электроника: учебное пособие для теплоэнергетических спец. вузов / А. С. Красько, К. Г. Скачко. – Минск : Высшая школа, 1984 – 208 с. (С. 167–173, 177–185, 187–190, 193–194).

## Додаток А

### ЗМІСТ ЗВІТУ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ

Звіт про лабораторну роботу – це документ, що вміщує опис проведених експериментів, отримані результати у вигляді таблиць, графіків (осцилограм) тощо, розрахункові значення та висновки з виконаної роботи.

Звіт містить:

- 1) **титульний лист**, на якому необхідно вказати (приклад виконання титульного листа наведено на рисунку А1):
  - а) адміністративну приналежність навчального закладу;
  - б) назву навчального закладу (повну та скорочену);
  - в) назву кафедри, що проводить заняття;
  - г) слова «ЗВІТ ПРО ЛАБОРАТОРНУ РОБОТУ №...» і далі номер та назву лабораторної роботи;
  - д) номер курсу і групи, прізвище та ініціали виконавця;
  - е) підпис виконавця і дату виконання роботи;
  - ж) вчене звання (посаду), вчену ступінь, прізвище та ініціали викладача;
  - з) назву міста та рік складання документа;
- 2) **текст звіту**, до якого входять:
  - а) мета лабораторної роботи;
  - б) перелік устаткування та вимірювальних приладів;
  - в) схеми установок, на яких проводились експерименти, або схеми електронних пристроїв, що досліджувались (*виконуються згідно з вимогами державних стандартів і з застосуванням креслярського знаряддя – рекомендується застосовувати радіотехнічний трафарет*);
  - г) таблиці з експериментальними і розрахунковими даними та побудовані за ними графіки;
  - д) розрахункові формули (у схемах, таблицях і формулах необхідно застосовувати стандартні умовні позначення);
  - е) осцилограми;
  - ж) висновки, у яких наводяться пояснення отриманих результатів.

Міністерство освіти і науки України  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

ЗВІТ  
про лабораторну роботу № 1  
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНИХ І ПОЛЬОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ

Виконала: студентка 3 курсу групи Сінж 2016-1

Вакуленко К. Є.

Прийняв: доцент, канд. техн. наук

Колонтаєвський Ю. П.

Харків – 2017

Рисунок А1 – Приклад виконання титульного аркуша

*Навчальне видання*

Методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт  
із навчальної дисципліни

**«КОМП'ЮТЕРНА ЕЛЕКТРОНІКА»**

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності  
151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології)*

Укладачі: **КОЛОНТАЄВСЬКИЙ** Юрій Павлович,  
**ТУГАЙ** Дмитро Васильович

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *К. А. Алексанян*

Дизайн обкладинки *Ю. П. Колонтаєвського*

План 2017, поз. 231 М

---

Підп. до друку 11.09.2017  
Друк на різнографі  
Зам. №

Формат 60×84/16  
Ум. друк. арк. 4,6  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017 р.

*Для нотаток*

*Для нотаток*

Письмена можуть бути  
втрачені,  
брехня може бути написана,  
але те, що побачили очі,  
є істина  
і залишається в пам'яті.

Джозеф Конрад