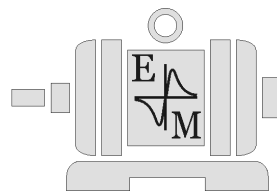


Міністерство освіти і науки України  
Національний гірничий університет



Кафедра електричних машин



## ***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ***

до виконання лабораторних робіт з дисциплін:  
"ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ  
ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ"  
та "ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ"

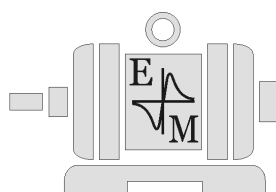
для студентів напрямів 0902 – Інженерна механіка,  
0903 – Гірництво, 0707 – Геологія  
(Розділ " Основи електроніки ")



Міністерство освіти і науки України  
Національний гірничий університет



Кафедра електричних машин



## ***МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ***

до виконання лабораторних робіт з дисциплін:  
"ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ  
ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ"

та "ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ"

для студентів напрямів 0902 – Інженерна механіка,  
0903 – Гірництво, 0707 – Геологія  
(Розділ "Основи електроніки")

Дніпропетровськ  
НГУ  
**2007**

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисциплін: "Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки" та "Основи електроніки" для студентів напрямів 0902 – Інженерна механіка, 0903 – Гірництво, 0707 – Геологія (Розділ "Основи електроніки") / Упорядн.: Д.В. Ципленков, А.А. Колб, – Д.: НГУ, 2007. – 41 с.

Упорядники:

Ципленков Дмитро Володимирович, доцент кафедри електричних машин (60 %)

Колб Андрій Антонович, доцент кафедри електричних машин (40 %)

Відповідальний за випуск Ципленков Д.В.,  
заст. завідувача кафедри електричних машин, канд. техн. наук, доцент.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12/1

### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАПІВПРОВІДНИКОВОГО ДІОДА І ТИРИСТОРА

**Мета роботи:** Вивчити призначення, принцип роботи та властивості напівпровідникового діода і тиристора. Зняти їхні вольт-амперні характеристики.

#### Програма роботи

1. Вивчити призначення, принцип роботи та властивості напівпровідникового діода і тиристора.
2. Зняти вольт-амперні характеристики (ВАХ) напівпровідникового діода.
3. Виконати дослідження вмикання і вимикання тиристора.
4. Складання звіту.

#### Порядок виконання роботи

##### Етап 1. Вивчення призначення, принципу роботи та властивостей напівпровідникового діода і тиристора

Користуючись літературою, що рекомендується, методичними вказівками, вивчити призначення, принцип дії та основні властивості напівпровідникового діода і тиристора.

##### Етап 2. Зняття вольт-амперних характеристик діода

Схема стенду для дослідження характеристик напівпровідникового діода представлена на рис. 1.1.

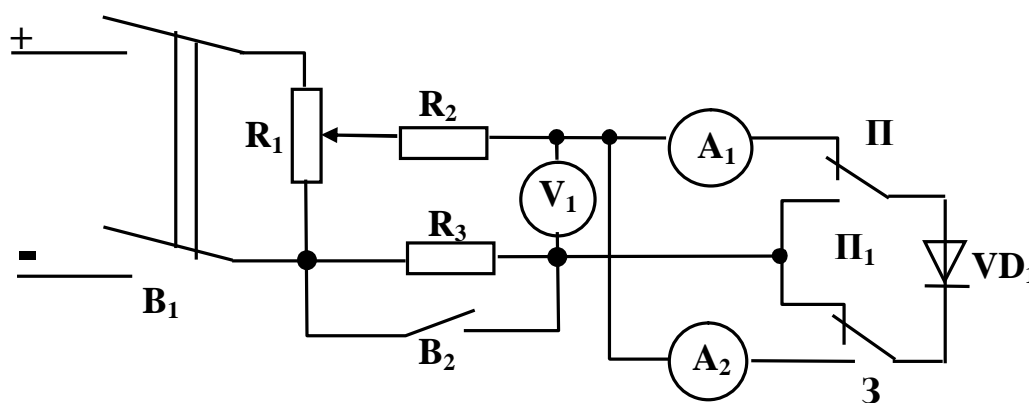


Рисунок 1.1. – Стенд для дослідження характеристик напівпровідникового діода

Потенціометр  $R_1$  призначений для зміни напруги, що подається на діод  $VD_1$ . Опори  $R_2$  і  $R_3$  обмежують струм діода. Спадання напруги на діоді вимірюється вольтметром  $V_1$ . Перемикач  $\Pi_1$  дозволяє змінювати полярність напруги, що підводиться до діода, і знімати завдяки цьому пряму і зворотну вітку вольт-

амперної характеристики. Прямий струм діода вимірюється міліамперметром  $A_1$ , зворотний - мікроамперметром  $A_2$ .

Перевести перемикач  $\Pi_1$  у положення "П" для зняття прямої вітки ВАХ. Увімкнути вимикач  $B_2$ .

Увімкнути вимикач  $B_1$  і встановити за допомогою потенціометра  $R_1$  напругу, яка дорівнює нулю.

Поступово збільшуючи напругу, записати в табл.1.1 показання вольтметра  $V_1$  і міліамперметра  $A_1$  (показання міліамперметра  $A_1$  необхідно помножити на 40).

Перевести перемикач  $\Pi_1$  у положення "З" для зняття зворотної вітки ВАХ. Вимикач  $B_2$  увімкнути.

Збільшуючи за допомогою потенціометра  $R_1$  напругу, що підведена до діода, записати в табл.1.1 показання вольтметра  $V_1$  і мікроамперметра  $A_2$ .

Таблиця 1.1.

*Дані для побудови вольт-амперної характеристики діода*

Пряма вітка	U, В										
	I, мА										
Зворотна вітка	U, В										
	I, мкА										

### Етап 3. Дослідження вмикання і вимикання тиристора

Схема для дослідження характеристик тиристора наведена на рис. 1.2. Вона дозволяє знімати тільки пряму вітку вольт-амперної характеристики.

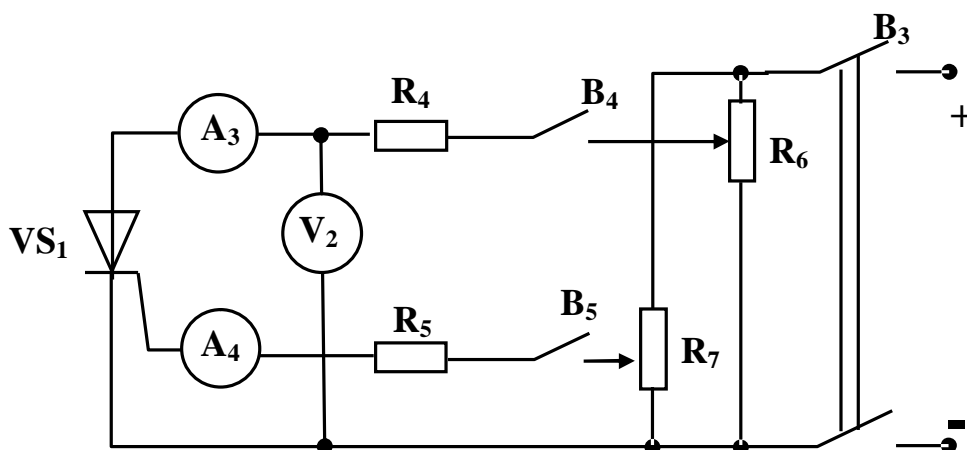


Рисунок 1.2. – Стенд для дослідження характеристик тиристора

Напруга, що подається на анод тиристора  $VS_1$ , регулюється потенціометром  $R_6$ , а на керуючий електрод - потенціометром  $R_7$ . Вольтметр  $V_2$  призначений для вимірювання спаду напруги між анодом і катодом, міліамперметри  $A_3$  і  $A_4$  – для вимірювання анодного струму і струму керуючого електрода відповідно.

Установити максимально можливий струм керуючого електрода і вимкнути вимикач  $B_5$ .

Подати на анод максимально можливу напругу і переконатися, що тиристор закритий (струм анода малий).

Увімкнути  $B_5$  і переконатися, що тиристор відкритий (струм анода різко зріс).

Переконатися, що зняття керуючого сигналу не приводить до закриття тиристора.

Знижуючи напругу на аноді, домогтися вимикання тиристора.

#### **Етап 4. Складання звіту**

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Схему лабораторної установки (рис. 1.1 та 1.2).
3. Таблицю 1.1.
4. Вольт-амперні характеристики діода та тиристора.

#### **Методичні вказівки**

##### **До етапу 1**

Діоди і тиристори відносяться до напівпровідникових приладів. Напівпровідники за рівнем питомого електричного опору займають проміжне положення між провідниками (метали, металеві сплави, графіт та ін.), що мають малий опір, і діелектриками (слюда, кераміка, різні полімерні матеріали), опір яких досить високий.

Найбільш розповсюдженими напівпровідниковими матеріалами є германій і кремній, причому не чисті, а що мають особливого роду домішки, які додають напівпровідниковому матеріалові специфічні властивості.

Розрізняють напівпровідники  $n$ -типу, насичені негативно зарядженими вільними електронами, і напівпровідники  $p$ -типу, у яких переважають позитивно заряджені іони кремнію, або германію (дірки).

Напівпровідниковий діод являє собою двошаровий кристал германію або кремнію, один шар якого має провідність  $n$ -типу, інші –  $p$ -типу. Границя між шарами називається  $p$ - $n$ -переходом.

Якщо зовні до  $p$ - $n$ -переходу електричне поле не прикладене, то електрони з  $n$ -шару частково дифундують у  $p$ -шар, а дірки  $p$ -шару – у шар з  $n$ -провідністю (рис. 1.3, а). Коло  $p$ - $n$ -переходу частина електронів і дірок рекомбінує (тобто

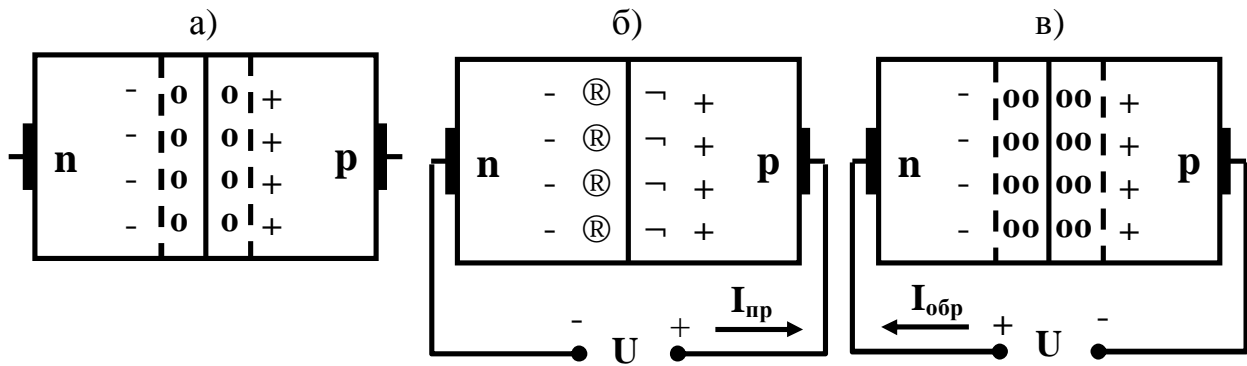


Рисунок 1.3. – Схеми до пояснення властивостей p-n-переходу

поєднуються в електричні нейтральні атоми). Завдяки цьому провідність p-n-переходу, насиченого вільними носіями заряду, помітно знижується.

Якщо двошаровий напівпровідник увімкнути в зовнішнє електричне поле так, щоб до p-переходу був прикладений позитивний потенціал, а до n-шару – негативний, то це буде сприяти виштовхуванню носіїв заряду в сусідній шар і появи дифузійного струму (рис. 1.3, б). Таке вмикання називається прямим.

При зворотній полярності прикладеної до p-n-переходу напруги (рис. 1.3, в) дифузія носіїв заряду через p-n-перехід утрудняється, провідність переходу різко знижується і струм через перехід на кілька порядків менше струму при прямому вмиканні.

Залежність струму через діод від прикладеної напруги (вольт-амперна характеристика) наведена на рис. 1.4, а. За позитивні напрямки напруги і струму прийняті їхні напрямки при прямому вмиканні. Як видно з рис. 1.4, а, вольт-амперна характеристика діода нелінійна. З ростом прямої напруги нахил її спочатку зростає, а потім залишається практично незмінним. При негативних напругах нахил досить малий (на рис. 1.4, а масштаб прямих і зворотних струмів та напруг різний). При напругах, більших від напруги пробою  $U_{пр}$ , відбувається різкий зріст зворотного струму і руйнування p-n-переходу.

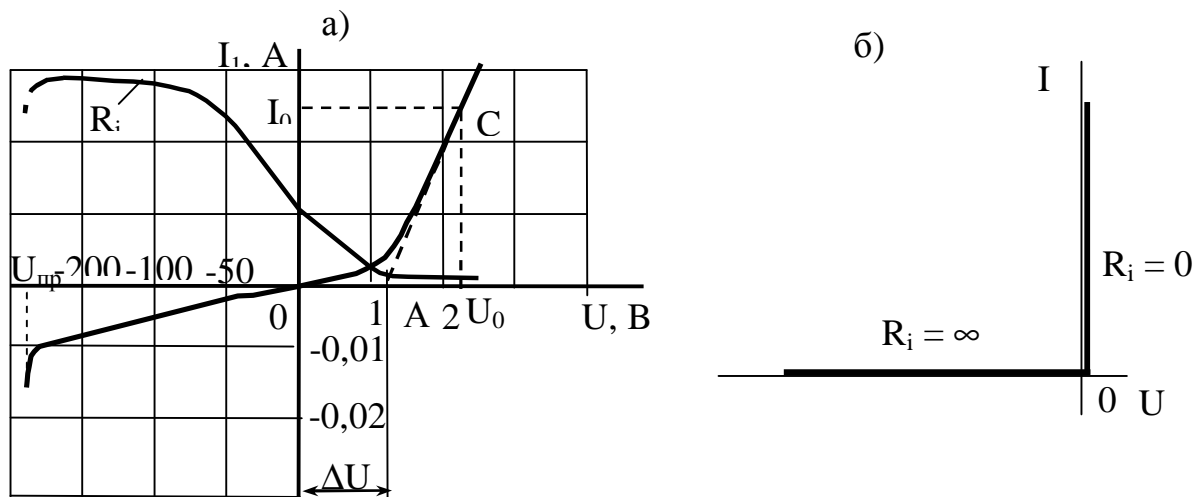


Рисунок 1.4. – ВАХ діода: а – реального; б – ідеального



Основні параметри ВАХ діода:

- статичний опір  $R_0 = \frac{U_0}{I_0}$ ;
- динамічний опір  $R_{\text{диф}} = \frac{dU}{dI} = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ .

Часто-густо реальну пряму вітку ВАХ заміняють ламаною ОАС, де відрізок ОА, як правило, лежить у межах 0,5...2,0 В. При  $U > \Delta U$  напруга зв'язана зі струмом залежністю  $U = \Delta U + IR_{\text{диф}}$ . Величина динамічного опору в прямому напрямку досить мала, у зворотному – велика, тому при аналізі кіл з діодами часто нехтують величинами  $IR_{\text{диф}}$  і  $\Delta U$ , вважаючи ВАХ діода ідеальною (рис. 1.4, б), а сам діод – ідеальним вентилям, опір якого дорівнює нулю в прямому напрямку і нескінченності – у зворотному.

У діодах, що випускаються промисловістю, *p-n*-перехід укладений у скляний або металевий корпус. Маються два виводи для приєднання до зовнішнього електричного кола: анод, з'єднаний з *p*-шаром, а катод, з'єднаний з *n*-шаром. Позначення діода на електричних схемах наведено на рис. 1.5.

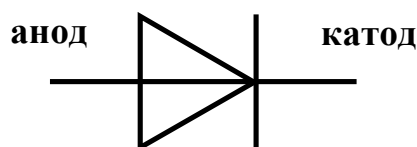


Рисунок 1.5. – Умовне позначення діода

При використанні діодів в електронних схемах, для правильного їхнього вибору необхідно враховувати ряд нормованих параметрів, що подаються в довідниках:

1. Максимально припустимий середній прямий струм. Його величина визначається, з одного боку, потужністю втрат у *p-n*-переході

$$P = UI \approx \Delta UI + I^2 R_{\text{диф}},$$

що збільшуються з ростом струму, а з іншого боку, здатністю діода розсіяти у навколишнє середовище тепло, що виділяється в ньому. Для підвищення припустимого струму потужних діодів використовують спеціальні радіатори, які збільшують тепловіддачу.

2. Повторювальна імпульсна зворотна напруга, величина якої складає приблизно  $0,7U_{\text{пр}}$ .

3. Максимальний зворотний струм, що характеризує неідеальність зворотної вітки ВАХ.

За потужністю діоди поділяють на малопотужні (прямий струм до 0,3 А), середньої (0,3 – 10 А) і великої потужності (10 – 1000 А і більш). Максимальна зворотна напруга кремнієвих діодів досягає декількох кіловольтів.

Малопотужні діоди, як правило, приєднуються до зовнішнього кола шляхом пайки, більш потужні - за допомогою нарізних з'єднань або шляхом притиснення до струмоведучої шини.

Використовуються діоди у випрямних і логічних схемах.

Тиристорами називають керовані (на відміну від діодів) напівпровідникові прилади на основі багат шарових (чотири шари або більше)  $p-n$ -переходів, здатних під дією сигналу керування переходити із закритого (непровідного) стану у відкрите (провідне).

Найбільш розповсюдженою є чотиришарова  $p-n-p-n$ -структура (рис. 1.6, а), стан якої залежить не тільки від напрямку прикладеної до катода та

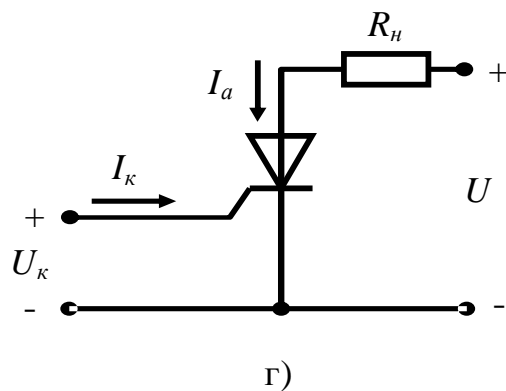
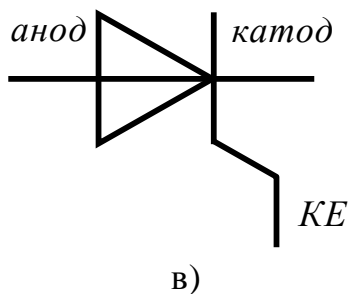
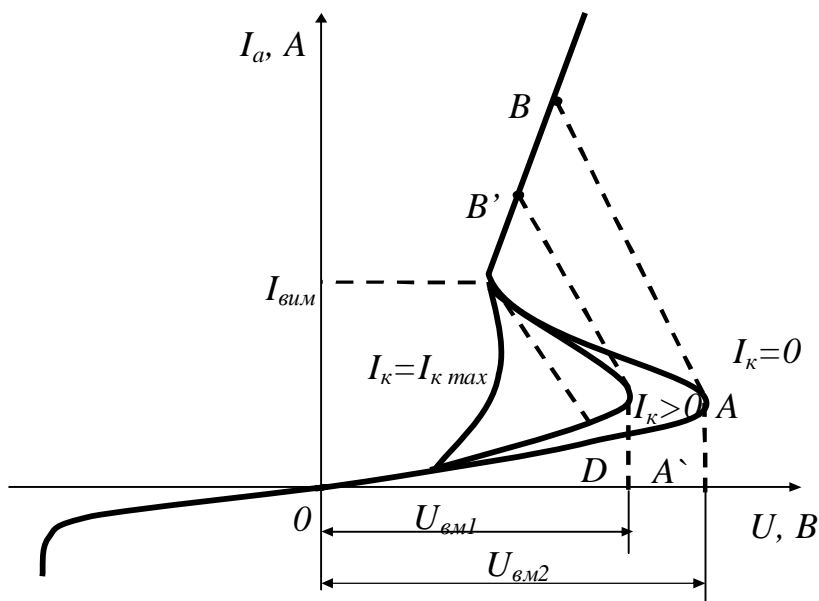
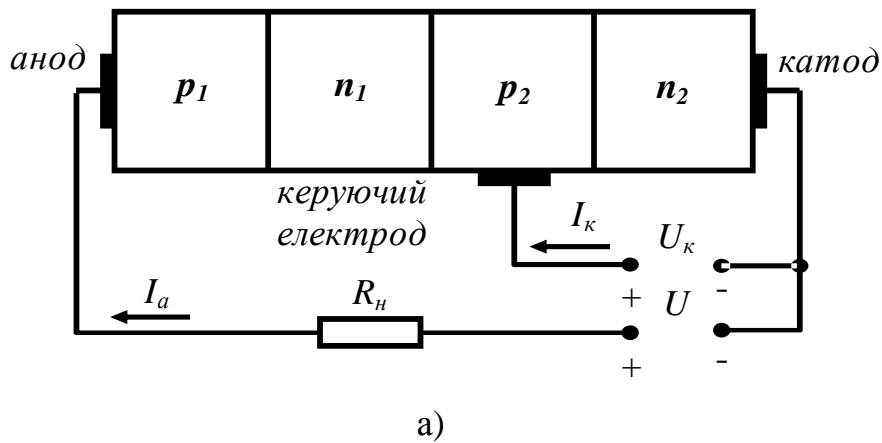


Рис. 1.6. – Тиристор: а – його структура; б – вольт-амперна характеристика; в – графічне позначення на електронних схемах; г – схема вмикання

анода напруги, але і від наявності напруги між шарами  $p$ - (керуючим електро- дом) і  $n$ - (катодом) переходів. ВАХ тиристора наведена на рис. 1.6, б. При від- сутності напруги керування  $U_K$  і збільшенні прямої напруги тиристор замкне- ний доти, поки напруга катод – анод не досягне величини напруги вмикання  $U_{\text{вм}}$ . При подальшому зростанні напруги також збільшується анодний струм (перехід з т. А в т. В). Як правило, такий спосіб сприяє пошкодженню приладу через великі струми після вмикання.

Якщо ж між катодом і керуючим електро- дом прикладена напруга керу- вання, то вмикання відбувається при значно меншій прямій напрузі (траєкторія АВ).

Якщо після увімкнення тиристора зняти керуючу напругу, то тиристор залишиться у провідному стані доти, поки анодний струм буде більше від стру- му вимикання  $I_{\text{вим}}$ . При меншому анодному струмі тиристор закривається (пе- рехід з т. С в т. D).

Зворотна вітка ВАХ тиристора подібна діодній.

Таким чином, тиристор, власне кажучи, являє собою керований діод з лі- нійною характеристикою, причому відкривання його відбувається при додатку позитивних (щодо катода) напруг до анода і керуючого електро- да. Відкритий стан зберігається і після зняття керуючої напруги. Закривання тиристора відбу- вається при зниженні анодного струму до величини, меншої від струму вими- кання. Іншими словами, за допомогою керуючого електро- да можна лише увімк- нути тиристор, але не вимкнути його (тобто керованість тиристора – неповна).

Умовне позначення тиристора наведено на рис. 1.6, в, а схема вмикання – на рис. 1.6, г.

Крім параметрів, загальних з діодами, для тиристорів нормуються:

1. Керуючий струм відмикання і керуюча напруга відкривання, при яких забезпечується надійне відкривання тиристора навіть при малих анодних на- пругах.

2. Критична швидкість зростання анодного струму при вмиканні  $\left(\frac{dI}{dt}\right)_{\text{max}}$ , що обмежується перегрівом структури (лежить у межах 10–100 А/мкс, у швид- кодуючих тиристорів досягає 1000 А/мкс).

3. Припустима швидкість зростання прямої напруги  $\left(\frac{dU}{dt}\right)_{\text{max}}$ , (20 – 100 В/мкс у звичайних і до 500 В/мкс у швидкодіючих тиристорах).

4. Час вимкнення – часовий інтервал, через який після припинення проті- кання анодного струму до приладу можна прикласти пряму напругу і при цьо- му не відбудеться його повторне вмикання (100 – 500 мкс у звичайних і 10 – 100 мкс у швидкодіючих тиристорах).

Зовні тиристор подібний діодові і відрізняється від нього лише наявністю третього виводу. Основне застосування тиристорів – силова електроніка, де він використовується як безконтактний ключ у керованих (регульованих) випрям- лячах, інверторах, безконтактних пускачах. Найбільше розповсюдження тири- сторів

тори отримали в регульованих електроприводах верстатів із ЧПУ і промислових роботів.

Випускаються тиристори на струми до декількох кілоампер.

### Контрольні запитання

1. На основі яких хімічних елементів виготовляються напівпровідникові матеріали?
2. Що таке  $p-n$ -перехід?
3. У яких випадках через  $p-n$ -перехід протікає найбільший струм: при відсутності різниці потенціалів між  $n$  і  $p$ -шаром, при позитивному або негативному потенціалі на  $p$ -шарі стосовно  $n$ -шару?
4. Чим обумовлений дифузійний струм через  $p-n$ -перехід?
5. Дайте визначення напівпровідникового діода.
6. Перелічіть основні параметри напівпровідникових діодів.
7. Дайте формулювання динамічного опору діода.
8. Як нахил прямої вітки ВАХ діода або тиристора впливає на величину максимально припустимого середнього прямого струму?
9. Які умови необхідно дотримуватися для вмикання і вимикання тиристора?
10. У чому полягає неповна керованість тиристора?
11. У чому виявляються властивості напівпровідникового діода як електричного вентиля?

### Список рекомендованої літератури

1. Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. – Д.: НГУ, 2004. – 512 с. (§§ 13.2-13.3, стор. 336 – 361)
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (§ 1.3, стор. 18 – 20, §§ 1.7, 1.8, стор. 34 – 40).

### ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12/2

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

**Мета роботи:** Вивчити призначення, принцип роботи і характеристики біполярного транзистора.

#### Програма роботи

1. Вивчити призначення, принцип роботи і властивості біполярного транзистора та схему лабораторної установки.

2. Експериментально одержати вихідні дані для побудови сімейства вихідних вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзистора при різних струмах бази.

3. Експериментально одержати вихідні дані для побудови передатних характеристик підсилювача за схемою із загальним емітером при незмінній напрузі живлення.

4. Складання звіту.

## Порядок виконання роботи

### Етап 1. Вивчення призначення, принципу роботи і властивостей біполярного транзистора та схеми лабораторної установки

Користуючись літературою, що рекомендується, і методичними вказівками, вивчити призначення, принцип дії і основні властивості біполярного транзистора

Вивчити схему лабораторної установки, яка зображена на рис. 2.1.

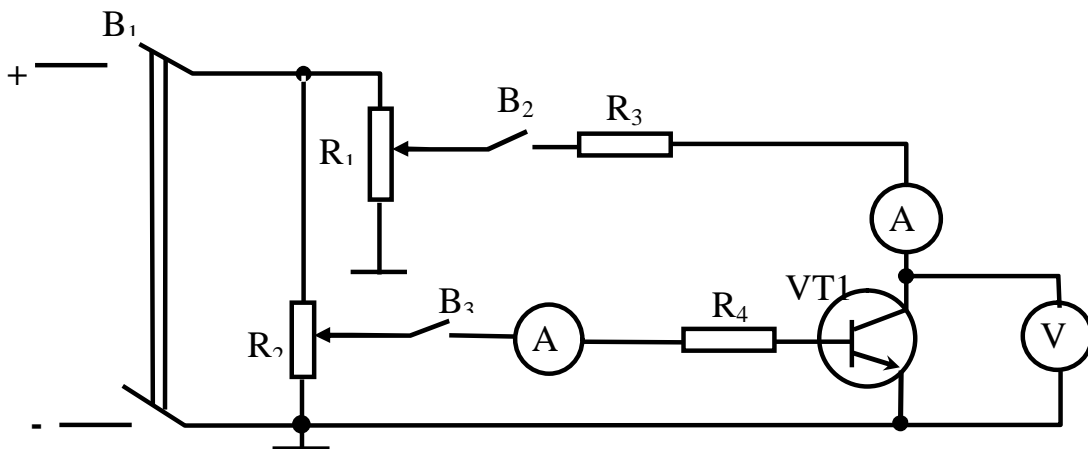


Рисунок 2.1. – Схема лабораторної установки для дослідження біполярного транзистора

### Етап 2. Зняття вихідної ВАХ транзистора

Увімкнути вимикачі  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$ . За допомогою потенціометрів  $R_1$  і  $R_2$  установити струми бази і колектора, щоб дорівнювали нулю.

Збільшуючи за допомогою потенціометра  $R_1$  величину напруги, підведеної до колектора, від нуля до максимально можливої, записати в табл. 2.1 значення струму колектора  $I_k$  і напруги між колектором і емітером  $U_{ке}$ .

Установити за допомогою потенціометра  $R_2$  максимально можливий струм бази і повторити вимірювання.

Зменшити струм бази до величини, зазначеної викладачем, і повторити вимірювання.

Таблиця 2.1.

Дані для побудови вихідної ВАХ транзистора  $I_k = f(U_{ке})$ 

Параметр	Перший дослід				Другий дослід				Третій дослід			
$I_{\bar{\sigma}}, \text{мА}$												
$U_{ке}, \text{В}$												
$I_k, \text{мА}$												

За результатами вимірів побудувати вихідну ВАХ транзистора.

### Етап 3. Зняття передатної характеристики транзистора

Установити за допомогою потенціометра  $R_1$  напругу  $U_{ке} = 9 \text{ В}$ , а за допомогою  $R_2$  струм бази, щоб дорівнював нулю.

Збільшуючи струм бази від нуля до максимально можливого, вимірити струм колектора і напругу "колектор-емітер".

Результати вимірів занести в табл. 2.2.

Таблиця 2.2.

Дані для побудови передатних характеристик транзистора

$$U_{ке} = f(I_{\bar{\sigma}}) \text{ та } I_k = f(I_{\bar{\sigma}})$$

$I_{\bar{\sigma}}, \text{мА}$											
$I_k, \text{мА}$											
$U_{ке}, \text{В}$											
$R, \text{Ом}$											
$P_{ке}, \text{Вт}$											

За результатами вимірів розрахувати опір  $R = \frac{U_{ке}}{I_k}$  та потужність

$P_{ке} = U_{ке} I_k$ . Побудувати в одній системі координат передатні характеристики транзистора  $U_{ке} = f(I_{\bar{\sigma}})$  та  $I_k = f(I_{\bar{\sigma}})$ , а також залежність  $P_{ке} = f(I_{\bar{\sigma}})$ .

### Етап 4. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Схему лабораторної установки.
3. Таблиці 2.1 та 2.2.

4. Сімейство вольт-амперних характеристик  $I_K = f(U_{ке})$  транзистора, передатні характеристики транзистора  $U_{ке} = f(I_б)$  та  $I_K = f(I_б)$  та залежність  $P_{ке} = f(I_б)$ .

## Методичні вказівки

### До етапу 1

**Транзистор** є напівпровідниковим приладом, що складається, на відміну від діода, із трьох шарів напівпровідникового матеріалу різного типу провідності і має три виводи. Залежно від перемінності розміщення цих шарів транзистори поділяють на два види: *n-p-n* і *p-n-p* – транзистори. Перший вид транзисторів має внутрішній шар провідністю *p*-типу, другий – *n*-типу. Внутрішній шар називається базою, зовнішні – колектором і емітером. Наявність третього виводу робить транзистор керованим приладом, причому виводи колектора є силовими (подібно катодові й анодові діода), а вивід бази – керуючим (струм у колі бази звичайно набагато менше від струмів колектора і емітера).

Транзистор має два *p-n*-переходи: колектор – база (К – Б) і база – емітер (Б – Е). До переходу К – Б, як правило, прикладають замикаючу напругу, до переходу Б – Е – вимикаючу напругу. Залежно від способів подачі цих напруг розрізняють три схеми увімкнення транзистора: зі спільним емітером, спільним колектором і спільною базою. Найбільш розповсюджена схема зі спільним емітером для *pnp* – транзистора. Схема увімкнення *pnp*-транзистора аналогічна, необхідно лише змінити полярність відповідних напруг на протилежну.

## Контрольні запитання

1. У чому полягає відмінність транзистора від діода і тиристора?
2. Для яких цілей застосовуються в електронних схемах транзистори?
3. Зобразіть схему підсилювача зі спільним емітером на *pnp*-транзисторі.
4. Сформулюйте, чим відрізняються режими роботи транзистора (активний, відсічення, насичення).
5. Дайте визначення колекторної вихідний ВАХ транзистора.
6. Що таке передатна характеристика транзисторного підсилювача?
7. Як зміниться коефіцієнт передачі за струмом, якщо: а) зменшити напругу живлення колектора; б) зменшити опір навантаження  $R_K$  у колі колектора?
8. У чому полягає відмінність режимів роботи та області застосування підсилювачів класів А і D?
9. Чому при керуванні підсилювачем, що працює в ключовому режимі, прагнуть до того, щоб темп зміни керуючого (вхідного) сигналу був як можна великим?

## Список рекомендованої літератури

1. Шкрабець Ф.П., Ципленков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. – Д.: НГУ, 2004. – 512 с. (§§ 13.3, стор. 341 – 361).
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (§ 1.4, стор. 20 – 25).

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12/3

### ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І СХЕМ ВМИКАННЯ ОПЕРАЦІЙНОГО ПІДСИЛЮВАЧА

**Мета роботи:** Вивчити призначення, принцип роботи і характеристики операційного підсилювача в різних схемах вмикання.

#### Програма роботи

1. Вивчити призначення, принцип роботи і властивості операційних підсилювачів.
2. Зняти статичні характеристики ОП при роботі без зворотного зв'язку.
3. Зняти статичні характеристики ОП при роботі у режимі інвертуючого підсилювача.
4. Зняти характеристику роботи ОП при роботі у режимі повторювача напруги.
5. Зняти статичні характеристики ОП при роботі у режимі інвертуючого суматора.
6. Зняти характеристику роботи ОП при роботі у режимі інвертуючого інтегратора.
7. Зняти характеристику роботи ОП при роботі у режимі пропорційно-інтегруючого підсилювача.
8. Складання звіту.

#### Порядок виконання роботи

##### Етап 1. Вивчення призначення, принципу роботи і властивостей операційних підсилювачів

Користуючись літературою, що рекомендується, і методичними вказівками, вивчити призначення, принцип роботи і основні властивості операційних підсилювачів.



## Етап 2. Дослідження роботи ОП без зворотного зв'язку

Вивчити схему лабораторної установки (рис. 3.1). Переконайтеся, що всі вимикачі вимкнені, а повзунці опорів  $R_3$ ,  $R_4$  повернені до упору за годинниковою стрілкою (уведено опір по 10 кОм).

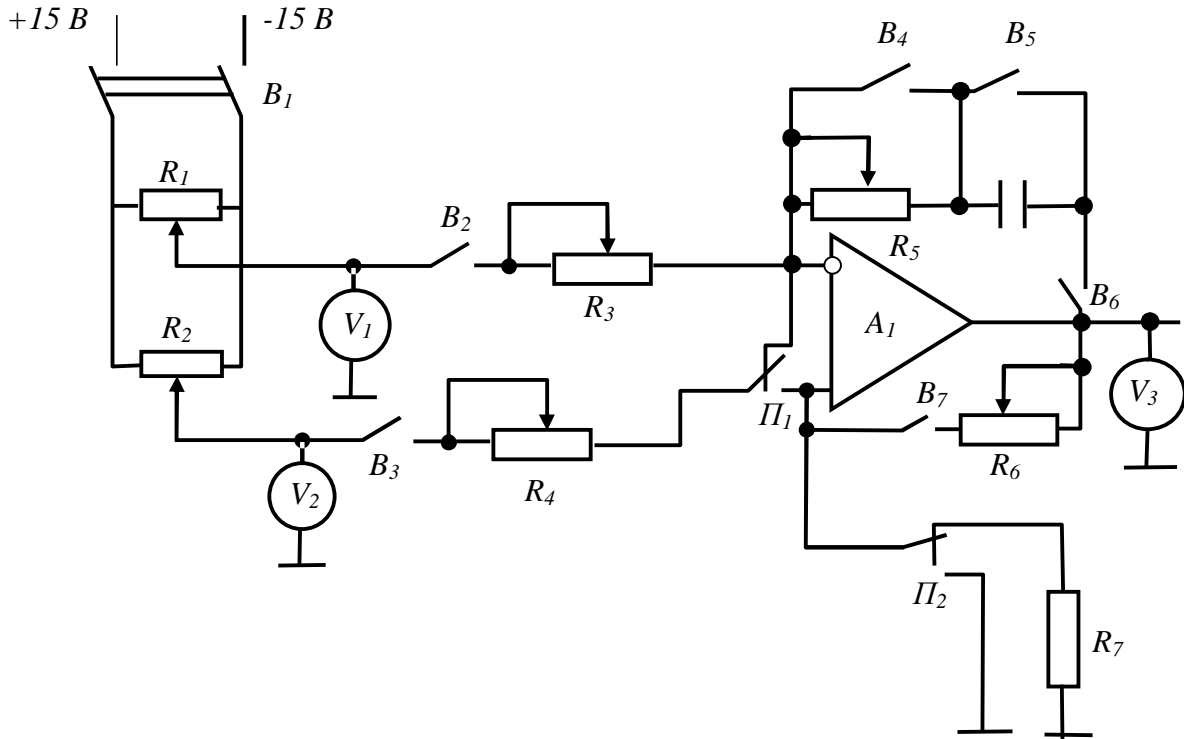


Рисунок 3.1. – Схема лабораторної установки

Перевести перемикачі  $\Pi_1$  у положення 1 (напруга подається на вхід, що інвертує), а  $\Pi_2$  униз (на неінвертуючий вхід подається напруга нульового рівня).

Ввімкнути вимикачі  $B_2$  або  $B_3$ . Вимкнути вимикачі  $B_4$ ,  $B_5$ ,  $B_6$ ,  $B_7$

Подати в схему напругу, ввімкнувши вимикач  $B_1$ .

Поставивши повзунець потенціометра  $R_1$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_2$ ) або  $R_2$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_3$ ) в одне з крайніх положень. Змінюючи величину напруги  $U_{вх1}$  ( $U_{вх2}$ ) за допомогою відповідних потенціометрів зняти залежність  $U_{вих}$  від  $U_{вх}$  при позитивних і негативних вхідних напругах, заносючи дані в табл.3.1.

Таблиця 3.1.

*Дані для побудови характеристик ОП при роботі без зворотного зв'язку*

$U_{вх}$ , В						
$U_{вих}$ , В						

## Етап 3. Дослідження роботи ОП у режимі інвертуючого підсилювача

Ввімкнути вимикачі  $B_5$ ,  $B_6$ , та  $B_2$  або  $B_3$ . Вимикачі  $B_4$ ,  $B_7$  вимкнути. Перемикачі  $\Pi_1$  та  $\Pi_2$  залишити у попередньому стані.

Перемістити повзунець резисторів  $R_3, R_4$  у крайнє положення за годинниковою стрілкою (уведено опір по 10 кОм). За допомогою резистора  $R_5$  встановити деякий коефіцієнт підсилення (визначити приблизно уведений опір, виходячи з того, що повний опір становить 68 кОм; відлік опору проводити за годинниковою стрілкою). Переміщаючи повзунець потенціометра  $R_1$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_2$ ) або  $R_2$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_3$ ) з одного крайнього положення в інше, зняти залежність  $U_{вих}$  від  $U_{вх}$ . Результати вимірів занести в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

*Дані для побудови характеристик ОП при роботі у режимі інвертуючого підсилувача. Коефіцієнт підсилення  $K = \underline{\hspace{2cm}}$ .*

$U_{вх}, В$							
$U_{вих}, В$							

#### Етап 4. Дослідження роботи ОП у режимі повторювача напруги

Ввімкнути вимикачі  $B_4, B_5, B_6$ , та  $B_2$  або  $B_3$ . Вимикач  $B_7$  вимкнути. Перемикачі  $П_1$  та  $П_2$  перевести у верхнє положення.

Переміщаючи повзунець потенціометра  $R_1$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_2$ ) або  $R_2$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_3$ ) з одного крайнього положення в інше, зняти залежність  $U_{вих}$  від  $U_{вх}$ . Результати вимірів занести в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

*Дані для побудови характеристик ОП при роботі у режимі повторювача напруги.*

$U_{вх}, В$							
$U_{вих}, В$							

#### Етап 5. Дослідження роботи ОП у режимі інвертуючого суматора

Ввімкнути вимикачі  $B_2, B_3, B_5$ , та  $B_6$ . Вимикач  $B_7$  вимкнути. Перемикач  $П_1$  перевести у положення 1 (напруга подається на вхід, що інвертує), а  $П_2$  униз (на неінвертуючий вхід подається напруга нульового рівня).

Перемістити повзунець резисторів  $R_3, R_4$  у крайнє положення за годинниковою стрілкою (уведено опір по 10 кОм). За допомогою резистора  $R_5$  встановити деякий коефіцієнт підсилення (визначити приблизно уведений опір, виходячи з того, що повний опір становить 68 кОм; відлік опору проводити за годинниковою стрілкою). Змінюючи положення повзунців потенціометрів  $R_1$  та  $R_2$  встановити різні значення напруг  $U_{вх1}$  та  $U_{вх2}$  на обох входах схеми та визначити напругу  $U_{вих}$  на виході ОП. Результати вимірів занести в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Дані для побудови характеристик ОП при роботі у режимі інвертуючого суматора. Коефіцієнт підсилення  $K = \underline{\hspace{2cm}}$ .

$U_{\text{вх1}}, \text{В}$							
$U_{\text{вх2}}, \text{В}$							
$U_{\text{вих}}, \text{В}$							

### Етап 6. Дослідження роботи ОП у режимі інвертуючого інтегратора

Ввімкнути вимикачі  $B_4, B_6$ . Вимикачі  $B_2, B_3, B_5$  та  $B_7$  вимкнути. Перемикач  $П_1$  перевести у положення 1 (напруга подається на вхід, що інвертує), а  $П_2$  униз (на неінвертуючий вхід подається напруга нульового рівня).

За допомогою резисторів  $R_3$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_2$ ) або  $R_4$  (якщо ввімкнено вимикач  $B_3$ ) встановити деяке значення сталої часу (визначити приблизно уведений опір, виходячи з того, що повний опір становить 10 кОм; відлік опору проводити за годинниковою стрілкою). Ємність конденсатора – 10 мкФ. Визначити сталу часу  $\tau$ , с.

Визначити час наростання сигналу від мінімального значення на виході до максимального, для чого встановити за допомогою потенціометрів  $R_1$  або  $R_2$  мінімальне значення напруги на входах та ввімкнути вимикачі  $B_2$  або  $B_3$ . В момент вмикання вимикачав почати відлік часу. Після досягнення максимального значення на виході – закінчити відлік часу.

Для зняття характеристики ОП при роботі в режимі інтегратора отримане значення часу розбити на рівні моменти часу, значення яких записати в табл. 3.5. Вимкнути вимикачі  $B_2$  або  $B_3$ . Встановити на входах схеми протилежні по знаку значення напруги та ввімкнувши вимикачі  $B_2$  або  $B_3$  для визначених моментів часу виміряти значення напруги на виході схеми. Результати вимірів занести в табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Дані для побудови характеристик ОП при роботі у режимі інтегратора.

Стала часу  $\tau = \underline{\hspace{2cm}}$  с.  $U_{\text{вх}} = \underline{\hspace{2cm}}$  В.

$t, \text{с}$							
$U_{\text{вих}}, \text{В}$							

### Етап 8. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Схему лабораторної установки (рис. 3.1).
3. Схеми дослідження ОП у різних режимах.

4. Таблиці 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5 з результатами досліджень.
5. Графіки характеристик ОП за даними табл. 3.1 (при роботі ОП без зворотного зв'язку) та табл. 3.2 (при роботі ОП у режимі інвертуючого підсилювача) у одній системі координат
6. Графік характеристики ОП за даними табл. 3.3 (при роботі ОП у режимі повторювача напруги).
7. Графік характеристики ОП за даними табл. 3.5 (при роботі ОП у режимі інтегратора).

## Методичні вказівки

### До етапу 1

При проектуванні електронних засобів різного призначення використовують не дискретні елементи (транзистори, діоди, резистори, конденсатори і т.п.), а закінчені функціональні вузли, виконані у вигляді інтегральних схем (ІС). Такий підхід дозволяє значно підвищити статичні, динамічні, експлуатаційні показники апаратури, істотно здешевити і скоротити терміни її проектування, яке фактично зводиться до розробки структури, що задовольняє поставленим вимогам, вибору необхідних ІС і узгодженню їх вхідних і вихідних характеристик

У даний час розроблено велике число аналогових ІС (АІС) як загального, так і спеціального призначення. До них, в першу чергу, слід віднести АІС підсилювачів постійного струму (операційних підсилювачів), схем порівняння (компараторів), джерел живлення (безперервних стабілізаторів напруги). Велику групу складають спеціалізовані АІС, призначені для побудови побутової апаратури.

Операційний підсилювач (ОП) – уніфікований багатокаскадний підсилювач постійного струму, що задовольняє наступним вимогам до електричних параметрів:

- коефіцієнт посилення по напрузі прагне нескінченності ( $K_{U_0} \rightarrow \infty$ );
- вхідний опір прагне нескінченності ( $R_{вх} \rightarrow \infty$ );
- вихідний опір прагне нуля ( $R_{вих} \rightarrow 0$ );
- якщо вхідна напруга рівна нулю, то вихідна напруга також рівна нулю ( $U_{вх} = 0 \rightarrow U_{вих} = 0$ );
- нескінченна смуга підсилюваних частот ( $f_B \rightarrow \infty$ ).

Історія назви операційного підсилювача зв'язана з тим, що подібні підсилювачі постійного струму використовувалися в аналоговій обчислювальній техніці для реалізації різних математичних операцій, наприклад підсумовування, інтеграції і ін.

Операційний підсилювач – це аналогова інтегральна схема, забезпечена, як мінімум, п'ятьма виводами. Її умовне графічне зображення приведено на рис. 3.2. Два виводи ОП використовуються як вхідні, один вивід є вихідним,

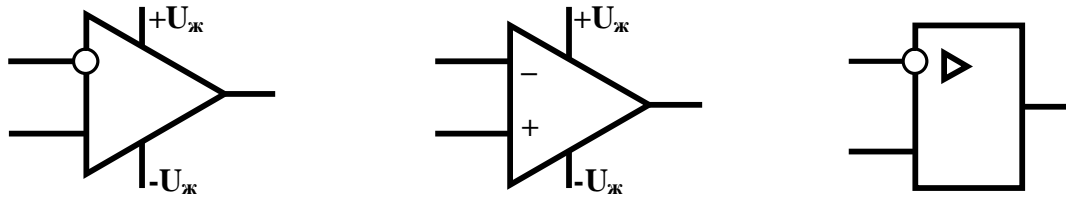


Рисунок 3.2. – Варіанти схемних позначень ОП

два виводи, що залишилися, використовуються для підключення джерела живлення ОП. З урахуванням фазових співвідношень вхідного і вихідного сигналів один з вхідних виводів (вхід 1) називається інвертуючим (позначається кружечком або мінусом), а інший (вхід 2) – неінвертуючим. Вихідна напруга  $U_{\text{вих}}$  пов'язана пов'язано з вхідними напругами  $U_{\text{вх1}}$  і  $U_{\text{вх2}}$  співвідношенням

$$U_{\text{вих}} = K_{U_0} (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}),$$

де  $K_{U_0}$  – власний коефіцієнт посилення ОП по напрузі.

З приведенного виразу виходить, що ОП сприймає тільки різницю вхідних напруг, звану диференціальним вхідним сигналом, і нечутливий до будь-якої складової вхідної напруги, що впливає одночасно на обидва його входи (синфазний вхідний сигнал).

Як було відзначено раніше,  $K_{U_0}$  в ОП повинен прагнути нескінченності, проте на практиці він обмежується значенням 105... 106 або 100... 120 дБ.

Як джерело живлення ОП використовують двополярне джерело напруги ( $+U_{\text{ж}}$ ,  $-U_{\text{ж}}$ ). Середній вивод цього джерела, як правило, є загальною шиною для вхідних і вихідних сигналів і в більшості випадків не підключається до ОП. В реальних ОП напруга живлення лежить в діапазоні  $\pm 3\text{В} \dots \pm 18\text{В}$ . Використання джерела живлення з середньою точкою припускає можливість зміни не тільки рівня, але і полярності як вхідної, так і вихідної напруг ОП.

Реальні ОП звичайно забезпечуються великим числом висновків, які використовуються для підключення зовнішніх ланцюгів частотної корекції, що формують необхідні характеристики підсилювача.

Реалізація перерахованих вище вимог до електричних параметрів ОП неможлива на основі схеми однокаскадного підсилювача. Тому реальні ОП будуються на основі дво- або трикаскадних підсилювачів постійного струму.

Функціональна схема трикаскадного ОП приведена на рис. 3.3. Вона включає вхідний, погоджуючий і вихідний каскади посилення.

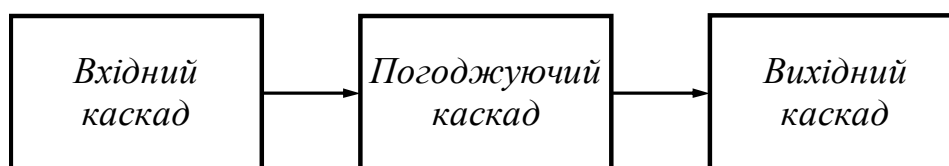


Рисунок 3.3. – Каскадна схема підсилювача

Аналіз електричних параметрів ОП показує, що їх практична реалізація припускає використання в якості вхідного каскаду ОП диференціального

підсилювального каскаду, що дозволяє максимально зменшити величину дрейфу підсилювача, одержати достатньо високе посилення, забезпечити отримання максимально високого вхідного опору і максимально подавити діючі на вході синфазні складові, обумовлені зміною температури навколишнього середовища, зміною напруги живлення, старінням елементів і т.п.

Погоджуючий каскад служить для узгодження вихідного сигналу диференціального підсилювача з вихідним каскадом ОП, забезпечуючи необхідне посилення сигналу по струму і напрузі, а також узгодження фаз сигналів.

Вихідний каскад, який, як правило, виконується по двотактній схемі, забезпечує необхідне посилення сигналу по потужності.

### **Основні параметри операційного підсилювача**

Операційний підсилювач є складним електронним пристроєм (еп), правильне вживання якого залежить від розуміння особливостей його роботи і знання основних вимог, які він пред'являє до схем пристрою, що розробляється. Нижче приводяться основні параметри ОП, характеризуючі його роботу.

*Коефіцієнт посилення по напрузі*  $K_{U_0}$  характеризує здатність ОП усилювати диференціальний сигнал, що подається на його входи

$$K_{U_0} = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}.$$

Типове значення коефіцієнта посилення ОП складає до  $10^5 \dots 10^6$  або 100... 120 дБ.

*Вхідна напруга зсуву* – ця напруга, яка обумовлена, в основному, неідентичністю напруг емітерних переходів транзисторів вхідного диференціального підсилювача. Іноді цю напругу називають напругою зсуву нуля ( $U_{3c}$ ). Типове значення цієї напруги одиниці – десятки мілівольт.

*Вхідний струм*  $I_{\text{вх}}$  (вхідний струм зсуву) – струм, що протікає у вхідних висновках ОП і необхідний для забезпечення необхідного режиму роботи його транзисторів по постійному струму. Типове значення цього струму – одиниці мікроамперів – сотні наноампер.

*Різниця вхідних струмів*  $\Delta I_{\text{вх}}$  (струм зсуву). Природа цього струму криється, в основному, в неоднаковості коефіцієнтів передачі струму транзисторів вхідного каскаду ОП. Типове значення параметра – від одиниць мікроамперів до одиниць і десятих часток наноампера.

*Вхідний опір*  $R_{\text{вх}}$ . Розрізняють:

- диференціальний вхідний опір  $R_{\text{вх.диф}}$  – опір між входами підсилювача;
- синфазное вхідний опір  $R_{\text{вх.синф}}$  – опір між з'єднаними вхідними висновками і нульовою шиною.

Типове значення вхідного опору – сотні килоом.

*Вихідний опір*  $R_{\text{вих}}$  – цей опір підсилювача, що розглядається як еквівалентний генератор. Типове значення вихідного опору – сотні ом.

*Коефіцієнт придушення синфазного сигналу* визначає ступінь придушен-

ня (ослаблення) синфазної складовій вхідного сигналу. Його типове значення – 50...70 дБ.

*Максимальна швидкість зміни вихідної напруги* характеризує частотні властивості підсилювача при його роботі в імпульсних схемах; Типове значення швидкості зміни вихідної напруги – одиниці вольт/мікро-секунду.

*Частота одиничного посилення* – це частота, на якій модуль коефіцієнта посилення ОП рівний одиниці. Звичайно ця частота не перевищує декількох мегагерц.

Окрім перерахованих звичайно задаються і гранично допустимі значення основних експлуатаційних параметрів:

- максимально допустима напруга живлення;
- максимально допустимий вихідний струм
- діапазон робочих температур;
- максимально допустима розсіювана потужність;
- максимально допустима вхідна синфазна напруга;
- максимально допустима вхідна диференціальна напруга і ін.

Більшість перерахованих параметрів сильно залежить від умов експлуатації.

У даний час ОП знаходять широке вживання при розробці різних аналогових і імпульсних електронних пристроїв. Пояснюється це тим, що, ввівши в ланцюзі прямої і зворотної передачі його сигналів різні лінійні і нелінійні ланцюги, можна направлений синтезувати вузли з необхідним алгоритмом перетворення вхідного сигналу.

Розглянемо деякі типові пристрої, які можуть бути побудовані з використанням ОП. При цьому вважатимемо, що маємо справу з ідеальним ОП. Далі користуватимемося наступними позначеннями:

$U_{\text{вх.н}}$  – вхідна напруга на неінвертуючому вході ОП;

$U_{\text{вх.і}}$  – вхідна напруга на інвертуючому вході ОП;

$U_{\text{вих}}$  – вихідна напруга ОП;

$K_{U_0}$  – коефіцієнт посилення ОП на постійному струмі.

## До етапу 2

При подаванні сигналу на неінвертований вхід, вихідна напруга

$$U_{\text{вих}} = K_{U_0} U_{\text{вх.н}}$$

При подаванні сигналу на інвертований вхід

$$U_{\text{вих}} = -K_{U_0} U_{\text{вх.і}}$$

При досягненні вихідною напругою напруги живлення  $U_{\text{жс}}$  її зростання припиняється (має місце "насичення" ОП). Завдяки високому коефіцієнтові підсилення насичення ОП відбувається при кране малих вхідних сигналах порядку мікрвольт.

Статична характеристика "вхід-вихід" ОП наведена на рис. 3.4, а (лінія 1).

Оскільки лінійна ділянка  $AOC$  досить мала, статична характеристика ОП близька до ідеальної релейної характеристики без гістерезису (рис. 3.4, б). Тому ОП без зворотних зв'язків застосовують як індикатори знака сигналу і компаратори. Для посилення сигналів така схема не застосовується через нестабільність коефіцієнта підсилення і вузької лінійної зони статичної характеристики.

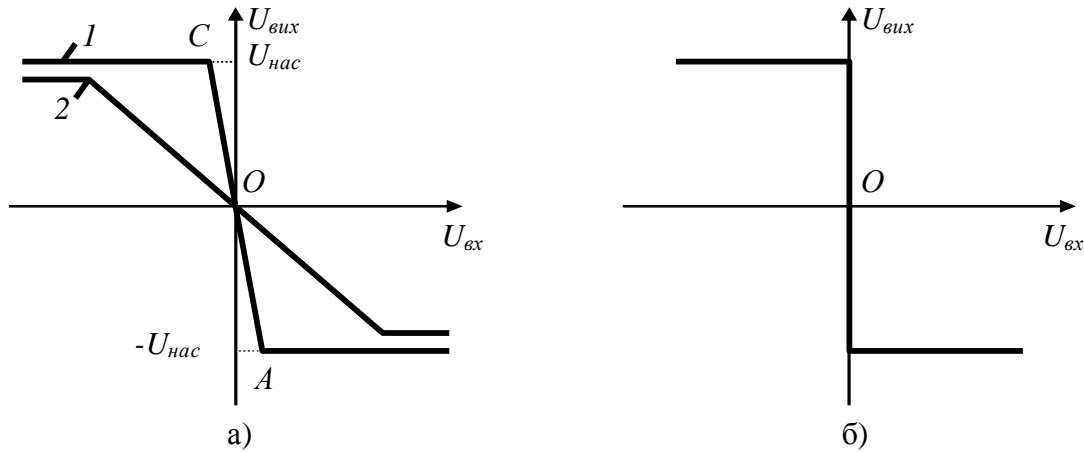


Рисунок 3.4. – Статичні характеристики ОП.

### До етапу 3

Для стабілізації коефіцієнта підсилення (хоча і ціною його зменшення) і розширення лінійної зони характеристики застосовують негативний зворотний зв'язок: вихідний сигнал або його частину порівнюють із вхідним, а їхню різницю подають на вхід ОП.

На рис. 3.5 зображено схему інвертуючого підсилювача з негативним зворотним зв'язком. Вихідна напруга через резистор  $R_{33}$  подається на вхід, інвертований, куди через резистор  $R_1$  також подається і вхідна напруга. Оскільки вхідний опір ОП близький до нуля, то і потенціал резисторів  $R_1$  і  $R_0$  відносно "землі" близький до нуля. Отже вся вхідна напруга прикладена до  $R_1$ , а уся вихідна – до  $R_0$ . Через те що вхідний струм близький до нуля, струми через  $R_1$  і  $R_0$  рівні:

$$U_{вх}/R_1 = - U_{вих}/R_{33}$$

(знак мінус враховує різні знаки вхідної і вихідної напруг).

Звідси

$$U_{вих} = - U_{вх} R_{33}/R_1.$$

Як впливає з останнього виразу, коефіцієнт підсилення схеми зі зворотним зв'язком визначається тільки співвідношенням опорів і не залежить від параметрів самого ОП  $K_{U_{33}} = \frac{R_{33}}{R_1}$  (лінія 2 на рис. 3.4, а). Тобто вибором резисторів кола негативного зворотного зв'язку коефіцієнт передачі інвертуючого підсилювача може бути зменшений до скільки завгодно малої величини. Зробле-



ний висновок не означає, що власне напруга, присутня па вході ОП, передається на його вихід з коефіцієнтом передачі, меншим одиниці. Це суперечило б властивостям ОП.

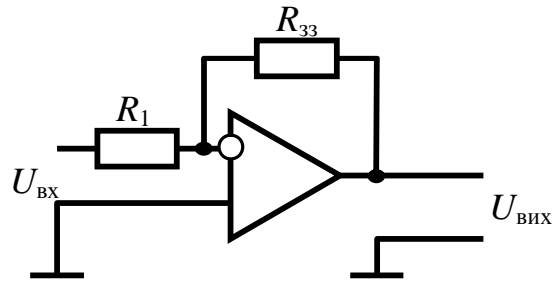


Рисунок 3.5.– Схема інвертуючого операційного підсилювача

#### До етапу 4

Схема повторювача напруги, побудована на основі ОП, приведена на рис. 3.6. Це підсилювач, охоплений колом послідовного негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) по вихідній напрузі з коефіцієнтом передачі  $b_{зз} = 1$ . Властивості такого підсилювача подібні властивостям емітерного повторювача і для нього виконується умова  $u_{ВХ.Н} = u_{ВИХ}$ , що добре узгоджується з властивостями ОП. Дійсно, поява будь-якої вхідної напруги відразу приводить до появи різниці  $u_{ВХ.І} - u_{ВХ.Н} = u_{ВИХ} - u_{ВХ.Н}$ . Ця різниця, передаючись на вихід ОП, змінює його вихідну напругу так, щоб компенсувати виникле відхилення і відновити умову  $u_{ВХ.Н} = u_{ВИХ}$ .

Розглянута схема подібно емітерному повторювачу знаходить практичне вживання як буферні або погоджують елементи.

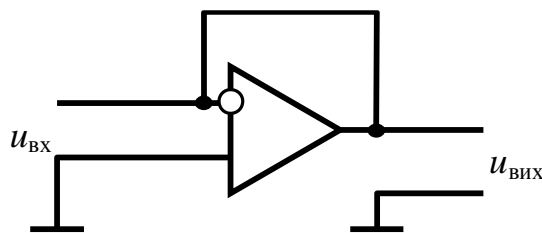


Рисунок 3.6.– Схема повторювача напруги

#### До етапу 5

Даний пристрій призначений для формування напруги, рівної посиленій алгебраїчній сумі декількох вхідних сигналів, тобто виконує математичну операцію підсумовування декількох сигналів. При цьому вихідний сигнал додатково інвертується, звідси і назва – інвертуючий суматор. Як приклад на рис. 3.7 приведена схема пристрою, що виконує дану операцію для трьох вхідних напруг.

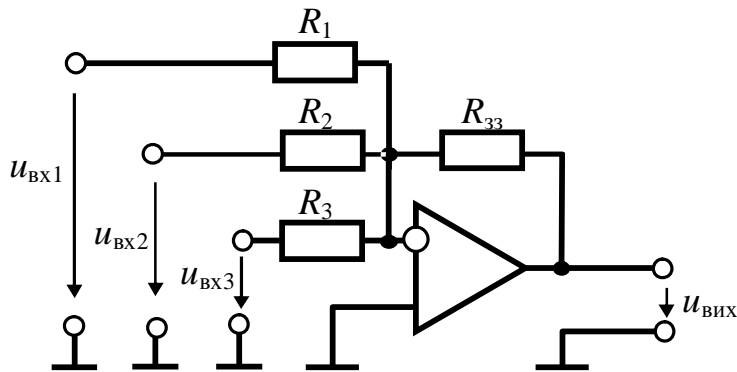


Рисунок 3.7.– Схема інвертуючого операційного підсилювача

Вважаючи ОП ідеальним, можна сказати, що  $u_{\text{вх.і}} = u_{\text{вх.н}}$ . Проте згідно приведеній схемі  $u_{\text{вх.і}} = 0$ . Отже, і  $u_{\text{вх.н}} = 0$ . В цьому випадку для інвертуючого входу згідно першому закону Кирхгофа можна записати

$$-\frac{u_{\text{ВИХ}}}{R_{33}} = \frac{u_{\text{ВХ1}}}{R_1} + \frac{u_{\text{ВХ2}}}{R_2} + \frac{u_{\text{ВХ3}}}{R_3},$$

звідки вихідна напруга

$$u_{\text{ВИХ}} = -u_{\text{ВХ1}} \frac{R_{33}}{R_1} - u_{\text{ВХ2}} \frac{R_{33}}{R_2} - u_{\text{ВХ3}} \frac{R_{33}}{R_3},$$

тобто сигнал на виході рівний інверсії від суми алгебри вхідних сигналів, узятих з своїми масштабними коефіцієнтами.

Даний вираз справедливий для будь-якого числа вхідних напруг.

Якщо  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ , одержимо

$$u_{\text{ВИХ}} = -(u_{\text{ВХ1}} + u_{\text{ВХ2}} + u_{\text{ВХ3}}) \frac{R_{33}}{R}.$$

Якщо в схемі на рис. 3.7 вибрати  $R_1 = R_2 = R_3 = R$  та  $R_{33} = \frac{R}{n}$ , то отримаємо

$$u_{\text{ВИХ}} = -\frac{(u_{\text{ВХ1}} + u_{\text{ВХ2}} + u_{\text{ВХ3}})}{n}.$$

Отже, на виході схеми формуватиметься напруга, рівна інвертованому середньому арифметичному від  $n$  вхідних напруг. Тому такі схеми називають схемами усереднювання.

Для здійснення операції віднімання достатньо подати вхідний сигнал на неінвертуючий вхід ОП.

### До етапу 6

Інтегратором називається пристрій, вихідний сигнал якого пропорційний інтегралу за часом від його вхідного сигналу.

Найпростіша схема інтегратора, виконана на ОП, приведена на рис. 3.8.

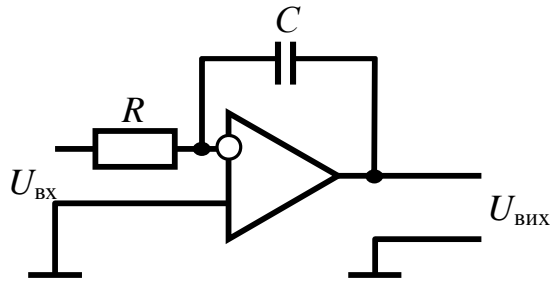


Рисунок 3.8.– Схема інвертуючого інтегратора

Дана схема є інвертуючим підсилювачем, в коло зворотного зв'язку якого включений конденсатор  $C$ .

Запишемо для інвертуючого входу ОП рівняння по першому закону Кирхгофа. Вважаючи, що  $u_{\text{ВХ.І}} = u_{\text{ВХ.Н}} = 0$ , отримаємо

$$\frac{u_{\text{ВХ}}}{R} = -C du_{\text{ВІХ}} dt .$$

Звідки

$$u_{\text{ВІХ}} = -\frac{1}{RC} \int u_{\text{ВХ}} dt .$$

Стала часу інтегруючої ланки  $\tau = RC$  .

### Контрольні запитання

1. Що називається операційним підсилювачем?
2. Перелічить основні особливості операційного підсилювача.
3. Дайте характеристику параметрам операційного підсилювача.
4. Як зображується операційний підсилювач на електронних схемах?
5. Яку структуру має найпростіший ОП?
6. Дайте характеристику каскадам, з яких будується ОП.
7. Для чого потрібний зворотний зв'язок в операційному підсилювачі?
8. Від чого залежить коефіцієнт підсилення ОП зі зворотним зв'язком?
9. Як зміниться напруга на виході ОП при обриві зворотного зв'язку?
10. Від чого залежить напруга на виході ОП у режимі насичення?
11. Чому коефіцієнт підсилення повторювача напруги дорівнює одиниці?
12. Дайте характеристику інвертуючому підсилювачу, інвертуючому суматору, інвертуючому інтегратору, повторювачу напруги.
13. Зобразіть схеми, які реалізують наступні рівняння:
  - $u_{\text{ВІХ}} = -(u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}} - u_{\text{ВІХ}})$ ;
  - $u_{\text{ВІХ}} = -(u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}}) \cdot 3$ ;
  - $u_{\text{ВІХ}} = -\int (u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}} + u_{\text{ВІХ}}) dt$  .
14. Зобразіть схему, яка реалізує усереднення чотирьох сигналів.

## Список рекомендованої літератури

1. Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. – Д.: НГУ, 2004. – 512 с. (§ 14.2, стор. 386 – 390).
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (§§ 2.9 – 2.12, стор. 76 – 87).

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА ЕМ 12/4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНЗИСТОРНОГО ПІДСИЛЮВАЧА НИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ

**Мета роботи:** Дослідити особливості роботи низькочастотного транзисторного підсилювача, виконаного на біполярному транзисторі.

### Програма роботи

1. Вивчення основних властивостей та призначення транзисторних підсилювачів.
2. Дослідження низькочастотного транзисторного підсилювача.
3. Складання звіту.

### Порядок виконання роботи

#### **Етап 1. Вивчення основних властивостей та призначення транзисторних підсилювачів**

Користуючись літературою, що рекомендується, і методичними вказівками, вивчити основні властивості та призначення транзисторних підсилювачів.

#### **Етап 2. Дослідження низькочастотного транзисторного підсилювача**

**2.1.** За допомогою стенда, розібратися зі схемою (рис. 4.1), попередньо вивчивши особливості контрольно-вимірвальних приладів, що застосовуються.

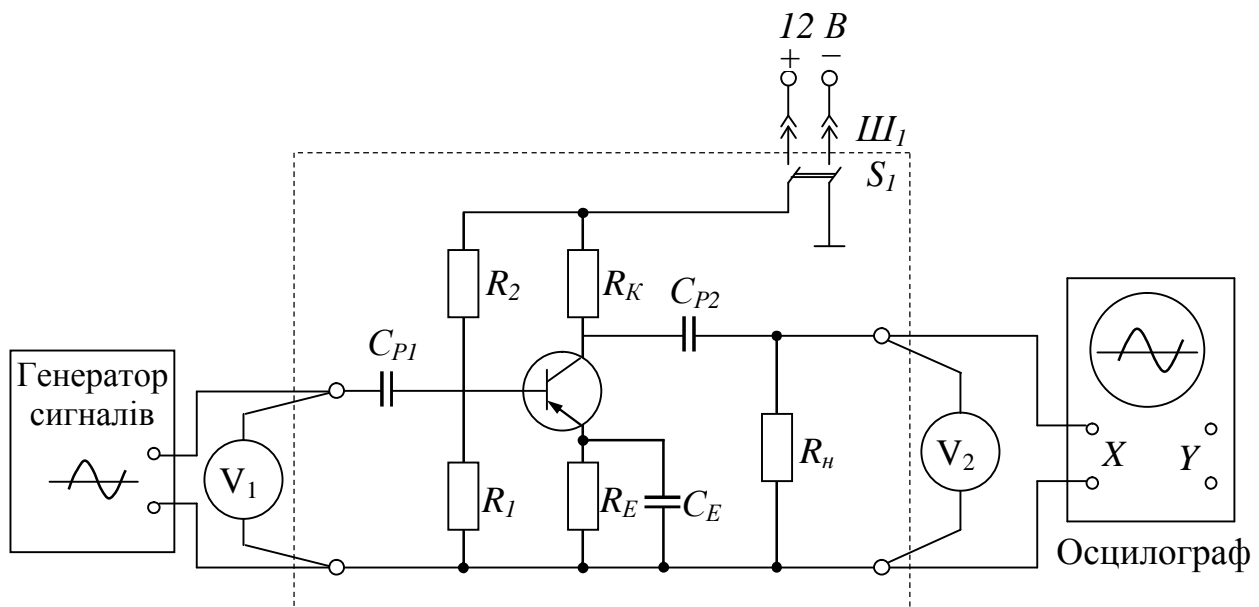


Рисунок 4.1. – Схема для дослідження транзисторного підсилювача низької частоти

**2.2.** Подати напругу живлення на прибори (генератор сигналів, вольтметри, осцилограф) та увімкнути вимикач  $S_1$ . Подати на вхід підсилювача напругу генератора звукової частоти ( $f = 1-3 \text{ кГц}$ ). За допомогою осцилографа та вольтметра  $V_1$  визначити максимальне значення вхідного сигналу  $U_{\text{вх}}^{\text{max}}$ , при якому немає помітного перекручування вихідного сигналу підсилювача. Змінюючи значення вхідного сигналу від 0 до  $(1,2-1,3)U_{\text{вх}}^{\text{max}}$ , зняти амплітудну характеристику підсилювача  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ . Результати вимірів занести в табл. 4.1.

Таблиця 4.1.

Амплітудна характеристика підсилювача при  $f = \text{_____ кГц}$ ;  $U_{\text{вх}}^{\text{max}} = \text{_____ В}$

$U_{\text{вх}}, \text{ В}$										
$U_{\text{вих}}, \text{ В}$										
$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$										

За даними табл. 4.1 побудувати амплітудну характеристику підсилювача  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ .

**2.3.** Встановити на вході підсилювача потужності вхідний сигнал на рівні  $U_{\text{вх}} = (0,4 - 0,6)U_{\text{вх}}^{\text{max}}$ . Змінюючи частоту вхідного сигналу від 0 до 50 кГц (відповідно табл. 4.2) та підтримуючи вхідний сигнал на незмінному рівні, зняти залежність коефіцієнта підсилення підсилювача  $K$  від частоти вхідного сигналу – амплітудно-частотну характеристику підсилювача. Результати вимірів занести в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика підсилювача

$$20\lg(K) = f(\lg(f)) \text{ при } U_{\text{вх}} = \text{const} = \text{_____ В}$$

$f, \text{Гц}$	20	50	100	250	500	1000	2500	5000	10000	15000	20000	50000
$U_{\text{вих}}, \text{В}$												
$K = \frac{U_{\text{вих}}}{U_{\text{вх}}}$												
$20\lg K$												

За даними табл. 4.2 побудувати в логарифмічному масштабі амплітудно-частотну характеристику підсилювача  $20\lg(K) = f(\lg(f))$ .

### Етап 3. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Схему експериментальних досліджень (рис. 4.1).
3. Таблиці 4.1 та 4.2 з експериментальними та розрахованими даними.
4. Амплітудну та логарифмічну амплітудно-частотну характеристики підсилювача.

### **Методичні вказівки**

#### До етапу 1

В теперішній час важко визначити область техніки, де б не знаходили використання підсилювачі електричних сигналів. Це пояснюється, як правило, невідповідністю параметрів електричних сигналів, одержуваних при первинному перетворенні різних неелектричних фізичних величин в електричні параметри, які необхідні для нормальної роботи більшості виконавчих (навантажувальних) пристроїв.

*Підсилювачем* називають пристрій, призначений для підсилення вхідного електричного сигналу за напругою, струмом або потужністю за рахунок перетворення енергії джерела живлення в енергію вихідного сигналу.

Процес підсилення електричних сигналів полягає в перетворенні енергії джерела живлення підсилювача в енергію вихідного сигналу за законом, який

обумовлений вхідним керуючим впливом. Іншими словами, будь-який підсилювач модулює енергію джерела живлення вхідним керуючим сигналом. Цей процес здійснюється за допомогою керованого нелінійного елемента.

Таким чином, для забезпечення підсилення сигналу підсилювач, послідовно з'єднаний з джерелом живлення, повинен містити в собі нелінійний елемент, керований вхідним електричним сигналом. Керовані нелінійні елементи сучасних підсилювачів виконуються, як правило, з використанням біполярних і польових транзисторів. Тому їх часто називають транзисторними підсилювачами.

Найважливішими характеристиками підсилювача є: коефіцієнт підсилення, смуга пропускання (діапазон робочих частот підсилювача), вхідний і вихідний опори, вихідна потужність.

### До етапу 2

Для отримання синусоїдального сигналу звукової частоти в роботі використовується ламповий генератор. На рис. 4.2 наведена його передня панель та вказано призначення деяких елементів. Для зміни частоти вихідного сигналу генератора застосовується перемикач множника 2 та регулятор плавної зміни частоти 3.



Рисунок 4.2. – Передня панель генератора синусоїдального сигналу звукової частоти:  
1 – перемикач режимів роботи; 2 – перемикач множника; 3 – регулятор плавної зміни частоти; 4 – регулятор напруги; 5 – запобіжник; 6 – виводи; 7 – обертовий індикатор; 8 – вимикач напруги живлення

частоти 3. Щоб отримати необхідне значення частоти, необхідно перемножити показання на обертовому індикаторі 7 та перемикача 2, наприклад:  $15 \cdot 100 = 1500$  Гц. Для зміни рівня напруги на виході застосовується регулятор 4.

Підсилення електричних коливань за допомогою транзистора засновано на залежності струму колектора від струму бази і, отже, від величини напруги, прикладеного до переходу "емітер-база". Досліджуваний у лабораторній роботі підсилювач є низькочастотним підсилювачем напруги із загальним емітером.

Вхідний сигнал, одержуваний за допомогою генератора сигналів у діапазоні частот від 0 до 50 кГц, подається на перехід "база-емітер" через розділовий конденсатор  $C_{P1}$ . Цей конденсатор розділяє генератор і транзисторний підсилювач за постійною складовою струму. Під впливом вхідного сигналу змінюється струм колектора  $I_K$ , що проходить через резистор  $R_K$ . Підсилена вихідна напруга знімається з переходу "колектор-емітер" через вихідний роздільний конденсатор  $C_{P2}$ , що виключає постійну складову напруги на навантажувальному резисторі  $R_H$ . Резистори  $R_1$  і  $R_2$  складають подільник напруги і формують напруги відповідно  $U_1$  і  $U_2$  для живлення емітерного і колекторного  $p-n$  – переходів. При правильно вибраних опорах резисторів  $R_1$  і  $R_2$  початкова робоча точка при нульовому вхідному сигналі розташовується посередині характеристики транзистора, чим досягається симетричність режиму роботи транзистора при будь-якій полярності вхідного сигналу.

У коло емітера включено стабілізуючий резистор  $R_E$ , спадання напруги на якому є зворотним для переходу "емітер-база". Тому в схемі підсилювача існує негативний зворотний зв'язок за струмом, що автоматично стабілізує режим роботи підсилювача. Дійсно, якщо за якоюсь випадковою причиною, наприклад, збільшується струм емітера  $I_E$ , то відповідно збільшується спадання напруги на резисторі  $R_E$ , що призводить до зменшення струму бази  $I_B$  під впливом згаданого негативного зворотного зв'язку й автоматичного зниження (відновлення) струму  $I_E$ . Резистор  $R_E$  у більшості випадків, щоб усунути зворотний зв'язок за змінною (корисною) складовою струму емітера і тим самим не допустити зниження коефіцієнта підсилення підсилювача за напругою, шунтують конденсатором  $C_E$  досить великої ємності.

Амплітудна характеристика підсилювача являє собою залежність вихідної напруги від вхідної напруги підсилювача  $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$  при деякій сталій частоті  $f$ . У робочому діапазоні амплітуд вхідного сигналу, коли виконується умова  $U_{\text{вх}}^{\text{min}} < U_{\text{вх}} < U_{\text{вх}}^{\text{max}}$ , амплітудна характеристика підсилювача має практично прямолінійний характер. Якщо  $U_{\text{вх}}^{\text{min}} > U_{\text{вх}}$ , то  $U_{\text{вих}}$  визначається напругою власних шумів підсилювача, що глушать корисний вихідний сигнал. Якщо  $U_{\text{вх}} > U_{\text{вх}}^{\text{max}}$ , то порушується пропорційність між вхідним і вихідним сигналами підсилювача через вихід робочої точки на нелінійну ділянку характеристик транзистора.



Амплітудно-частотна характеристика підсилювача являє собою залежність коефіцієнта підсилення підсилювача  $K$  від частоти  $f$  коливань вхідного сигналу. В області середніх частот коефіцієнт підсилення  $K$  практично не залежить від частоти. В області нижніх частот коефіцієнт підсилення  $K$  знижується через підвищення опору конденсаторів  $C_{P1}$ ,  $C_{P2}$ ,  $C_E$ . В області вищих частот коефіцієнт підсилення  $K$  знижується через вплив ємності колекторного  $p-n$  – переходу транзистора.

### **Контрольні запитання**

1. Яке призначення має транзисторний підсилювач?
2. Наведіть приклади застосування транзисторних підсилювачів.
3. Назвіть основні характеристики транзисторних підсилювачів.
4. Поясніть принцип роботи низькочастотного транзисторного підсилювача.
5. Як забезпечується стабілізація режиму роботи транзисторного підсилювача?
6. У яких режимах може працювати транзисторний підсилювач?
7. Що таке смуга пропускання транзисторного підсилювача?
8. Як впливає ємність роздільних конденсаторів на амплітудно-частотну характеристику підсилювача?
9. Що таке коефіцієнт підсилення підсилювача і від чого він залежить?
10. Чому відбувається перекручування вихідних сигналів при занадто великому вхідному сигналі підсилювача?
11. Чому відбувається зниження коефіцієнта підсилення транзисторного підсилювача в області низьких частот?
12. Чому відбувається зниження коефіцієнта підсилення транзисторного підсилювача в області високих частот?
13. Визначте смугу пропускання підсилювача, який ви досліджували.

### **Список рекомендованої літератури**

1. Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. – Дніпропетровськ. НГУ, 2004. – 512 с. (§ 14.1, стор. 370 – 383)
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (§§ 2.1 – 2.5, стор. 49 – 63)



Для контролю вихідних напруг випрямляча як функцій часу використовуються електронний осцилограф. Посилення осцилографа на вході "Y" необхідно вибрати таким, щоб зображення на його екрані було досить великим.

**1.3.** Зібрати електричне коло за схемою, як на рис. 5.2. Для цього необхідно ввімкнути вимикач  $S_3$ , а вимикач  $S_2$  перевести у положення "1" (рис. 5.1).

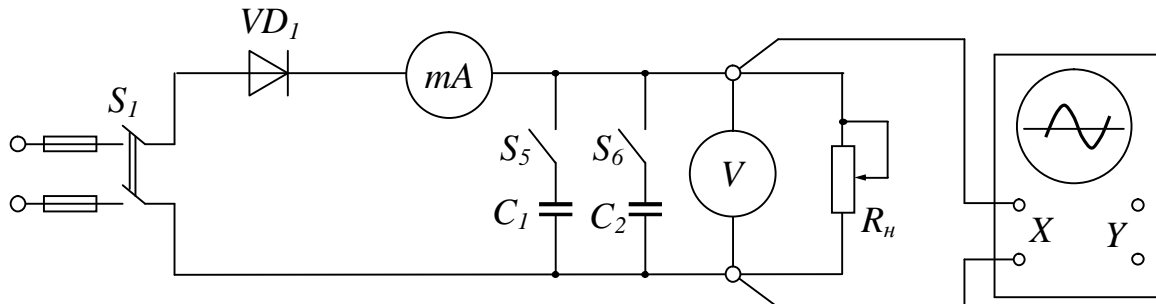


Рисунок 5.2. – Схема для дослідження однофазного однопівперіодного випрямляча

Подати напругу живлення – приєднати лабораторний стенд до живильної мережі – ввімкнути роз'ім Ш<sub>1</sub> вимикач  $S_1$ .

**1.4.** Виміри проводити при фіксованих значеннях струму навантаження (5 значень в діапазоні від 0 до 300 мА) і трьох значеннях ємності  $C_{\Phi}$  конденсатора згладжуючого фільтра ( $C_{\Phi}=0$ ; 20; 70 мкФ):

- при розімкнутих вимикачах  $S_5$  та  $S_6$  ( $C_{\Phi}=0$  мкФ);
- при замкненому вимикачі  $S_5$  ( $C_{\Phi}=20$  мкФ);
- при замкнутих вимикачах  $S_5$  та  $S_6$  ( $C_{\Phi}=70$  мкФ).

Результати вимірів занести в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Результати дослідження однопівперіодного випрямляча

№ з/п	Показання приладів					
	Без фільтра (при $C_{\Phi} = 0$ )		При включенні $S_5$ ( $C_{\Phi 1} = 20$ мкФ)		При включенні $S_5$ та $S_6$ ( $C_{\Phi 2} = 70$ мкФ)	
	$I, A$	$U_2, B$	$I, A$	$U_2, B$	$I, A$	$U_2, B$
1						
2						
3						
4						
5						

**1.5.** Зняти осцилограми кривих зміни напруги на навантаженні при найменшому значенні струму навантаження. Криві намалювати одна під одною в однаковому масштабі, з'єднавши початок відліку по вертикалі і з огляду на рівень, при якому напруга дорівнює нулю.

**1.6.** Вимкнути вимикач  $S_1$  та штучно створити режим неробочого ходу, для чого необхідно від'єднати навантаження від дослідного стенда.

**1.7.** Ввімкнути вимикач  $S_1$  та в режимі неробочого ходу виміряти середнє значення напруги на затискачах однопівперіодного випрямляча при наявності згладжуючого фільтра (вимикачи  $S_5$  та  $S_6$  ввімкнені) та його відсутності (вимикачи  $S_5$  та  $S_6$  вимкнені). Результати занести до табл. 5.2.

**1.8.** Розрахувати середнє значення напруги на затискачах випрямляча при наявності згладжуючого фільтра та його відсутності (діюче значення напруги у мережі складає 20 В). Результати занести до табл. 5.2.

Таблиця 5.2.

*Середні значення напруги на виході випрямляча режимі неробочого ходу*

Наявність згладжуючого фільтра	Однопівперіодний випрямляч		Двопівперіодний випрямляч	
	дослідне	розраховане	дослідне	розраховане
Так				
Ні				

**1.9.** За даними табл. 5.1 побудувати в одній системі координат зовнішні характеристики однопівперіодного випрямляча  $U_d = f(I)$  при трьох значеннях ємності конденсатора згладжуючого фільтра.

**1.10.** Зробити висновки, виходячи з впливу ємності конденсатора згладжуючого фільтра на форму кривої напруги на навантаженні. Порівняти значення напруги на затискачах однопівперіодного випрямляча при роботі у режимі неробочого ходу при відсутності та наявності згладжуючого фільтра з відповідними розрахованими даними.

## Етап 2. Дослідження однофазного двопівперіодного випрямляча

**2.1.** Користуючись літературою, що рекомендується, і методичними вказівками, вивчити будову і принцип роботи двофазних напівпровідникових випрямлячів з ємнісними згладжуючими фільтрами та без них.

**2.2.** Зібрати електричне коло за схемою, як на рис. 5.3. Для цього необхідно увімкнути вимикач  $S_4$ , а вимикач  $S_2$  перевести у положення "2" (рис. 5.3). Подати напругу живлення – приєднати лабораторний стенд до живильної мережі (рознімність  $\text{Ш}_1$ ) та увімкнути вимикач  $S_1$ .

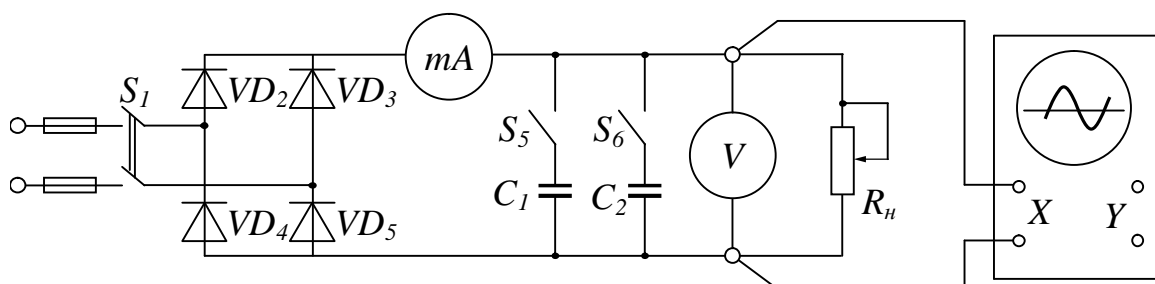


Рисунок 5.3. – Схема для дослідження однофазного двопівперіодного випрямляча

**2.3.** Виміри проводити при фіксованих значеннях струму навантаження (5 значень в діапазоні від 0 до 300 мА) і трьох значеннях ємності  $C_{\Phi}$  конденсатора згладжуючого фільтра ( $C_{\Phi}=0$ ; 20; 70 мкФ):

- при розімкнутих вимикачах  $S_5$  та  $S_6$  ( $C_{\Phi}=0$  мкФ);
- при замкнутому вимикачі  $S_5$  ( $C_{\Phi}=20$  мкФ);
- при замкнених вимикачах  $S_5$  та  $S_6$  ( $C_{\Phi}=70$  мкФ).

Результати вимірів занести в табл. 5.3.

Таблиця 5.3.

*Результати дослідження двопівперіодного випрямляча*

№ з/п	Показання приладів					
	Без фільтра (при $C_{\Phi} = 0$ )		При включенні $S_5$ ( $C_{\Phi 1} = 20$ мкФ)		При включенні $S_5$ та $S_6$ ( $C_{\Phi 2} = 70$ мкФ)	
	$I, A$	$U_2, B$	$I, A$	$U_2, B$	$I, A$	$U_2, B$
1.						
2.						
3.						
4.						
5.						

**2.4.** Зняти осцилограми кривих зміни напруги на навантаженні при найменшому значенні струму навантаження. Криві намалювати одна під одною в однаковому масштабі, з'єднавши початок відліку по вертикалі і з огляду на рівень, при якому напруга дорівнює нулю.

**2.5.** Вимкнути вимикач  $S_1$  та штучно створити режим неробочого ходу, для чого необхідно від'єднати навантаження від дослідного стенда.

**2.6.** Ввімкнути вимикач  $S_1$  та в режимі неробочого ходу виміряти середнє значення напруги на затискачах двопівперіодного випрямляча при наявності згладжуючого фільтра (вимикачі  $S_5$  та  $S_6$  ввімкнені) та його відсутності (вимикачі  $S_5$  та  $S_6$  вимкнені). Результати занести до табл. 5.2.

**2.7.** Розрахувати середнє значення напруги на затискачах двопівперіодного випрямляча при наявності згладжуючого фільтра та його відсутності (діюче значення напруги у мережі складає 20 В). Результати занести до табл. 5.2.

**2.8.** За даними табл. 5.3 побудувати в одній системі координат зовнішні характеристики двопівперіодного випрямляча  $U_d = f(I)$  при трьох значеннях ємності конденсатора згладжуючого фільтра.

**2.9.** Зробити висновки, виходячи з впливу ємності конденсатора згладжуючого фільтра на форму кривої напруги на навантаженні. Порівняти значення напруги на затискачах двопівперіодного випрямляча при роботі у режимі неробочого ходу при відсутності та наявності згладжуючого фільтра з відповідними розрахованими даними.

### Етап 3. Складання звіту

Звіт по даній лабораторній роботі повинен містити:

1. Найменування роботи, її мету та програму.
2. Схему лабораторного стенда (рис. 5.1) та схеми експериментальних досліджень (рис. 5.2 та рис. 5.3).
3. Табл. 5.1 – 5.3 з експериментальними та розрахованими даними.
4. Осцилограми напруг для однопівперіодного випрямляча:
  - $u_2 = f(t)$  при  $C_{\Phi}=0$ ;
  - $u_2 = f(t)$  при  $C_{\Phi1} = 20$  мкФ;
  - $u_2 = f(t)$  при  $C_{\Phi2} = 70$  мкФ.
5. Осцилограми напруг для двопівперіодного випрямляча:
  - $u_2 = f(t)$  при  $C_{\Phi}=0$ ;
  - $u_2 = f(t)$  при  $C_{\Phi1} = 20$  мкФ;
  - $u_2 = f(t)$  при  $C_{\Phi2} = 70$  мкФ.
6. Зовнішні характеристики  $U_d = f(I)$  однопівперіодного і двопівперіодного випрямлячів при трьох значення ємності конденсатора згладжуючого фільтра.
7. Розрахунок середнього значення напруги у режимі неробочого ходу для одно- та двопівперіодного випрямляча при наявності та відсутності згладжуючого фільтра.

### **Методичні вказівки**

Джерела вторинного електроживлення (ДВЖ) – це електронні пристрої, які призначені для перетворення енергії первинного джерела електроживлення в електричну енергію, значення частоти, рівня і стабільності якої узгоджені з вимогами, пропонованими до цих параметрів конкретними електронними пристроями і системами.

Як первинні джерела електроживлення для електронних пристроїв і систем використовують або промислову мережу змінного струму, або автономні джерела змінного (генератори) чи постійного (акумулятори, хімічні батареї і т.п.) струму.

У загальному випадку ДВЖ складаються з декількох функціонально закінчених блоків, які можна розбити на три основні групи пристроїв:

- узгодження частоти;
- узгодження рівня напруги;
- узгодження стабільності напруги.

## До етапів 1 та 2

Основними параметрами випрямлячів є:

1. Середнє значення вихідної напруги

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вих}} dt.$$

2. Середнє значення вихідного струму

$$I_d = \frac{1}{T} \int_0^T i_{\text{вих}} dt.$$

3. Коефіцієнт пульсації вихідної напруги (струму).

**Однофазний однопівперіодний випрямляч.** Найпростішим випрямлячем є схема однофазного однопівперіодного випрямляча.

При заданій вхідній напрузі  $u_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t$  для непарних його напівперіодів випрямлений струм у навантажувальному резисторі  $R_{\text{нав}}$  буде створювати на ньому спад напруги.

*Середнє значення напруги* випрямляча, що навантажений:

– активним опором

$$U_d = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вих}} dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U,$$

де  $U_m$  – амплітуда вхідної напруги;  $U$  – діюче значення вхідної напруги;

– тільки ємністю

$$U_d = U_m = \sqrt{2}U.$$

*Середній струм* у навантажувальному резисторі

$$I_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_{\text{вих}} dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi I_m \sin \omega t dt \approx \frac{I_m}{\pi} = 0,318I_m,$$

де  $I_m$  – амплітуда випрямленого струму.

*Максимальна зворотна напруга* на діоді  $U_{\text{д.звор}} = U_m$ .

*Коефіцієнт пульсації* дорівнює відношенню амплітуди основної гармоніки до середнього значення випрямленої напруги в режимі неробочого ходу. Для розглянутої схеми

$$\varepsilon = \frac{U_{m1}}{U_d} = \frac{\pi}{2} = 1,57.$$

Однопівперіодне випрямлення через високу пульсацію випрямленої напруги має низьку ефективність і тому знаходить обмежене застосування.

**Однофазний мостовий двопівперіодний випрямляч.** Параметри вихідної напруги випрямляча можна істотно поліпшити, якщо струм навантаження буде протікати в обидва напівперіоди дії вхідної напруги.

При заданій вхідній напрузі  $u_{\text{вх}} = U_m \sin \omega t$  для кожного з напівперіодів випрямлений струм у навантажувальному резисторі  $R_{\text{нав}}$  буде створювати на ньому спад напруги.

*Середні значення напруги* навантаження будуть у два рази перевищувати напругу однофазної однопівперіодної схеми. Для випрямляча, навантаженого на:

– активний опір

$$U_d = 2 \frac{U_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U;$$

– ємність

$$U_d = U_m = \sqrt{2} U.$$

*Середній струм* у навантажувальному резисторі

$$I_d = 2 \frac{I_m}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I,$$

де  $U_m$  і  $I_m$  – амплітудні значення вхідної напруги і струму, а  $U$  і  $I$  – їх діючі значення.

*Максимальна зворотна напруга* закритого діода  $U_{\text{д.звор}} = 2U_m$ .

*Коефіцієнт пульсацій* схеми однофазного двопівперіодного випрямляча

$$\varepsilon = \frac{U_{m1}}{U_d} = \frac{2}{(m^2 - 1)} = \frac{2}{2^2 - 1} = 0,67.$$

Отримані рівняння відображують, що ефективність однофазного двопівперіодного випрямляча значно вище однопівперіодного, що і визначило її широке застосування у схемах ДВЖ.

Стабілізація змінення вихідної напруги здійснюється введенням у коло передачі напруги додаткової ланки, коефіцієнт передачі якої для змінної складової напруги істотно менше постійної складової. У результаті постійна складова напруги проходить у навантаження практично без змін, а його змінна складова послабляється подільником, утвореним уведеною ланкою і навантаженням ДВЖ.

*Ємнісний згладжуючий фільтр* є найбільш простим і розповсюдженим фільтром. Він складається з конденсатора  $C_\phi$ , що включається паралельно опору навантаження.

Осцилографування кривих зміни напруги необхідно починати з кривої змінної напруги  $u_l = f(t)$  вибравши при цьому такий коефіцієнт підсилення по осі "Y" електронного осцилографа, щоб зображення на екрані було достатньо великим. Зная величину періодичної напруги (виміряти вольтметром) та амплі-



туду синусоїди на екрані осцилографа, достатньо легко встановити масштаб по напрузі

$$m_u = \frac{U_m}{n}, \frac{V}{\text{см}},$$

де  $n$  – кількість поділок на масштабній сітці, що є на екрані осцилографа.

Щоб зберегти цей масштаб для інших осцилограм, у подальшому положення ручок керування осцилографом не змінювати.

Якщо необхідно збільшити розворот кривої на екрані осцилографа по осі "Y", то зменшують масштаб по напрузі.

### Контрольні запитання

1. Поясніть основні властивості напівпровідникових діодів.
2. Поясніть призначення ДВЖ.
3. З яких вузлів складається ДВЖ.
4. Якими електричними параметрами характеризуються джерела вторинного електроживлення?
5. Намалювати схему однопівперіодного випрямляча із згладжуючим фільтром та активним навантаженням.
6. Поясніть принцип дії однопівперіодного випрямляча без згладжуючого фільтра.
7. Поясніть принцип дії однопівперіодного випрямляча із згладжуючим фільтром.
8. Намалювати схему двопівперіодного випрямляча із згладжуючим фільтром та активним навантаженням
9. Поясніть принцип дії двопівперіодного випрямляча без згладжуючого фільтра.
10. Поясніть принцип дії двопівперіодного випрямляча із згладжуючим фільтром.
11. Яке призначення згладжуючих фільтрів?
12. Як впливає ємність конденсатора на зовнішню характеристику випрямляча?
13. Що таке коефіцієнт пульсацій?
14. Що таке коефіцієнт згладжування?

### Список рекомендованої літератури

1. Шкрабець Ф.П., Циценков Д.В., Куваєв Ю.В. та ін. Електротехніка, основи електроніки та мікропроцесорної техніки. Навчальний посібник. – Д.: НГУ, 2004. – 512 с. (§ 14.5, стор. 401 – 417)
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с. (§§ 5.1 – 5.6, стор. 189 – 205)

## ДОДАТКОВА ЛІТЕРАТУРА

1. Аналоговая и цифровая электроника. Учебник для вузов. /Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 768 с.
2. Касаткин А.С., Немцов М.В.Электротехника. – М.: Высшая школа. 2002. – 542с.
3. Общая электротехника /Под ред. А. Т. Блажкина. – 4-0 изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 592 с.
4. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.

## З М І С Т

Лабораторна робота <b>ЕМ 12/1</b> Дослідження характеристик напівпровідникового діода і тиристора	3
Лабораторна робота <b>ЕМ 12/2</b> Дослідження характеристик біполярного транзистора	10
Лабораторна робота <b>ЕМ 12/3</b> Дослідження характеристик і схем вмикання операційного підсилювача	14
Лабораторна робота <b>ЕМ 12/4</b> Дослідження транзисторного підсилювача низької частоти	26
Лабораторна робота <b>ЕМ 12/5</b> Дослідження однофазних напівпровідникових випрямлячів	32
Додаткова література	40

Упорядники:  
Ципленков Дмитро Володимирович  
Колб Андрій Антонович

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт з дисциплін:  
"ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ  
ТА МІКРОПРОЦЕСОРНОЇ ТЕХНІКИ"  
та "ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ"  
для студентів напрямів 0902 – Інженерна механіка,  
0903 – Гірництво, 0707 – Геологія  
(Розділ " Основи електроніки ")

Редакційно-видавничий комплекс

Підписано до друку . .07. Формат 30x42/4.  
Папір Rollux. Ризографія. Ум. друк. арк. 2,28.  
Обл.-вид. арк. 2,28. Тираж 150 прим. Зам. №

Національний гірничий університет  
49027, м. Дніпропетровськ-27, просп. К. Маркса, 19.