

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет будівництва і архітектури

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт № 1–4
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
за спеціальностями 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка» та 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Київ 2024

ББК 32.973-01

К45

Укладачі: В.Ю. Луценко, канд. техн. наук, доцент;
М.В. Волчков, асистент

Рецензент Л.І. Мазуренко, д-р техн. наук, професор

Відповідальний за випуск А.В. Заприво́да, канд. техн. наук,
доцент

*Затверджено на засіданні кафедри автоматизації
технологічних процесів, протокол № 6 від 13 грудня 2023 року.*

В авторській редакції.

Електроніка та мікросхемотехніка : методичні вказівки до
К45 виконання лабораторних робіт №1–4 / уклад. : В.Ю. Луценко,
М.В. Волчков. – Київ : КНУБА, 2024. – 36 с.

Містять зміст, теоретичні відомості про будову, принцип дії, параметри та основні характеристики діодів, біполярних транзисторів та напівпровідникових підсилювачів, а також порядок оформлення і вказівки до виконання лабораторних робіт в середовищі Electronics Workbench з використанням віртуальних вимірювальних засобів.

Призначено для студентів спеціальностей 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

ЗМІСТ

Загальні положення.....	4
Лабораторна робота №1. Дослідження характеристик напівпровідникових діодів.	5
Лабораторна робота № 2. Дослідження вхідних та вихідних статичних характеристик біполярного транзистора.	12
Лабораторна робота №3. Транзисторний підсилювач з ємнісним зв'язком.....	20
Лабораторна робота №4. Дослідження роботи емітерного повторювача.....	29
Список літератури.....	35

ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Метою виконання лабораторних робіт є закріплення знань, наданих студентам під час вивчення курсу «Електроніка та мікросхемотехніка». Лабораторні роботи сприяють розвитку у студентів навичок критичного аналізу та самостійної роботи в процесі проєктування пристроїв на основі напівпровідникових приладів та використання засобів вимірювання електричних сигналів.

Перед виконанням лабораторної роботи студент обов'язково вивчає теоретичні відомості, що стосуються лабораторної роботи. Кожній лабораторній роботі передують розділи, що містять необхідні теоретичні відомості для її виконання, у той же час під час підготовки рекомендується використовувати матеріали підручника та лекційних занять.

У процесі виконання лабораторних робіт необхідно керуватися порядком їх виконання та суворо дотримуватися правил електричної та пожежної безпеки.

Звіт про виконання кожної лабораторної роботи повинен містити необхідні теоретичні відомості, схеми, таблиці з результатами вимірювань, що вказані в пункті «Порядок виконання роботи» в кожній лабораторній роботі.

Оформленні з дотримання відповідних вимог, звіти про виконання лабораторних робіт надаються студентом до захисту. Студент повинен відповісти на запитання викладача щодо теоретичних відомостей, змісту отриманих результатів вимірювань та побудованих графіків. За результатами захисту викладач виставляє оцінку за виконання лабораторної роботи.

Тематика лабораторних робіт відповідає програмі курсу «Електроніка та мікросхемотехніка» для спеціальностей 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Лабораторна робота № 1

Дослідження характеристик напівпровідникових діодів

Мета роботи – вивчити принцип дії і характеристики напівпровідникових діодів.

1. Короткі теоретичні відомості

Принцип дії напівпровідникового діода.

Напівпровідниковим діодом називають напівпровідниковий прилад з одним електричним переходом, що має два введення. У діодах р-п-перехід утворюється двома напівпровідниками з різними типами провідності.

На межі двох напівпровідників (рис. 1.1) за рахунок явища дифузії електрони з n-області переміщуються в р-область. У напівпровіднику в граничному шарі залишаються позитивно заряджені іони. Виникає просторовий заряд з напруженістю поля $E_{зш}$.

Електричне поле направлено від n-області до р-області. Це електричне поле перешкоджає подальшому руху електронів в область р через перехід. Крізь замикаючий шар можуть рухатися тільки неосновні носії.

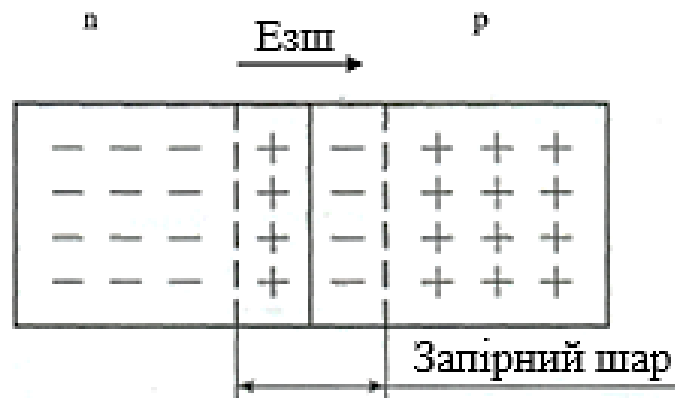


Рис. 1.1. Виникнення запiрного шару в р-п-переході

Зовнішня напруга U , прикладена до переходу, залежно від полярності буде посилювати чи послаблювати дію поля запiрного шару $E_{зш}$. Якщо «+» прикладений до n-області, а «-» до р-області (тобто підключена зворотна напруга), то електричне поле, створюване зовнішнім джерелом живлення – $E_{зов}$. буде додаватися до поля $E_{зш}$ запiрного шару. При цьому величина запiрного шару зросте, а ще менша кількість основних носіїв може подолати дію цього поля і перейти в сусідню область (рис. 1.2).

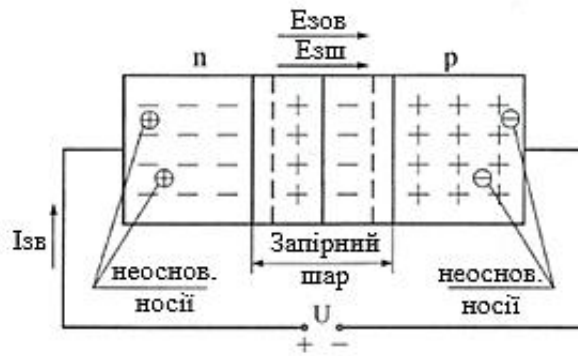


Рис. 1.2. р-n-перехід включений в зворотному напрямку

Через перехід проходить невеликий зворотний струм $I_{зв}$, обумовлений рухом неосновних носіїв.

Якщо зовнішня напруга прикладена в прямому напрямку, то зовнішнє електричне поле буде направлено назустріч полю запірного шару (рис. 1.3.)

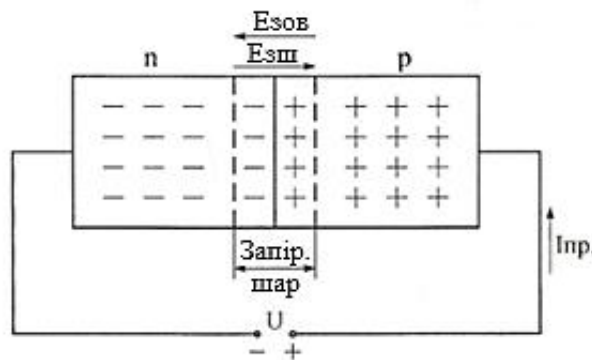


Рис. 1.3. р-n-перехід включений в прямому напрямку

У цьому випадку ширина запірного шару почне зменшуватися і за напруги зовнішнього джерела 0,3...0,5 В запірний шар повністю зникає. Опір переходу знижується і через нього проходить значний струм.

Вольт-амперна характеристика діода показана на рис. 1.4. Для наочності пряма і зворотна гілки вольт-амперної характеристики показані в різних масштабах.

Під час подальшого збільшення зворотної напруги зовнішнє електричне поле в запірному шарі стає настільки сильним, що здатне вирвати електрони з валентної зони в зону провідності (ефект Зенера). Зворотний струм різко зростає і, якщо його не обмежувати, виникає тепловий пробій р-n переходу.

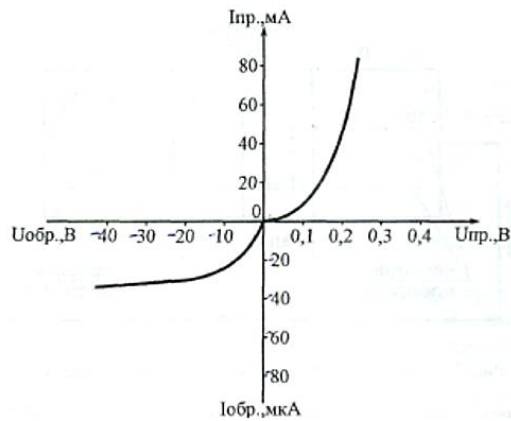


Рис. 1.4. Вольт-амперна характеристика випрямного діода

Існують кремнієві діоди – стабілітрони, у яких електричний пробій може наступити і за малих напруг (0,7...14 В). Ці діоди можуть нормально працювати на ділянці електричного пробою р-п-переходу. Як видно з рис. 1.5, напруга $U_{ст}$ мало змінюється за значних змінах струму через стабілітрон $I_{ст}$. Це явище широко використовується в пристроях, що носять назву – стабілізатори напруги.

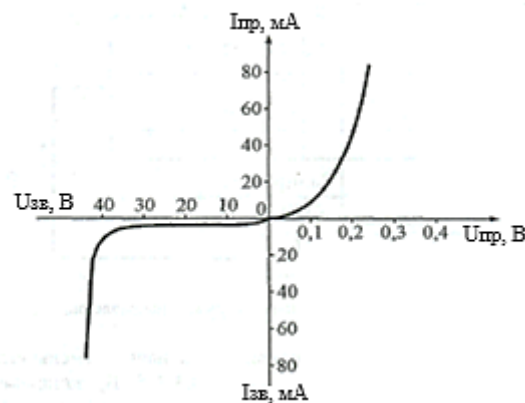


Рис. 1.5. Вольт-амперна характеристика стабілітрона

На рис. 1.6 наведена принципова схема найпростішого стабілізатора напруги з використанням стабілітрона.

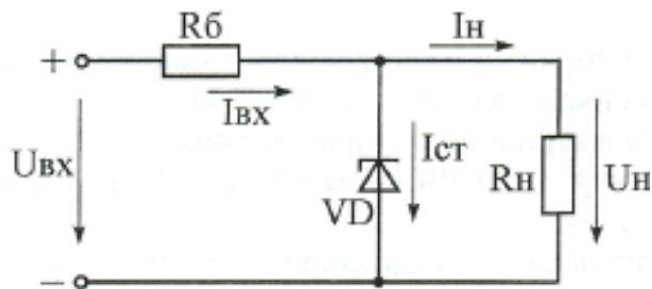


Рис. 1.6. Схема параметричного стабілізатора напруги

Припустимо, що вхідна напруга $U_{вх}$, що відповідає струму 12 мА (див. рис. 1.6), збільшилася. При цьому зростає струм $I_{вх}$ і струм $I_{ст}$. Але на навантаженні R_n напруга U_n і струм I_n практично не змінюються. При цьому збільшення напруги $\Delta U_{вх}$ падає на баластному опорі $R_б$:

$$\Delta U_{вх} = \Delta I_{вх} \cdot R_б.$$

Величина баластного резистора визначається з рівняння стану електричного кола:

$$R_б = \frac{U_{вх} - U_n}{I_{ст} + I_n}.$$

Для більшості стабілітронів струми стабілізації лежать в межах від 3 до 30 мА. Тому зазвичай середній струм через стабілітрон з урахуванням можливої зміни напруги на вході вибирається близько 12 ... 15 мА.

2. Порядок виконання роботи

2.1. Побудова вольт-амперної характеристики діода в прямому включенні (див. рис. 1.7).

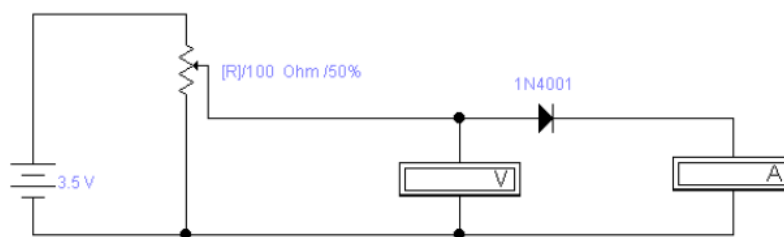


Рис. 1.7. Схема для отримання прямої гілки вольт-амперної характеристики діода

Перелік приладів:

- джерело постійної напруги 3,5 В;
- потенціометр на 100 Ом;
- випрямляючий діод 1N4001;
- амперметр;
- вольтметр.

Зібрати схему, показану на рис. 1.7. Змінюючи опір потенціометра від 0 до 95%, фіксувати показання амперметра і вольтметра. Отримані результати занести в табл. 1.1 «Результати вимірювань прямої гілки вольт-амперної характеристики діода».

Результати вимірювань прямої гілки вольт-амперної характеристики діода

	I	U	I	U	I	U
0			35		70	
5			40		75	
10			45		80	
15			50		85	
20			55		90	
25			60		95	
30			65			

За отриманими результатами намалювати пряму гілку ВАХ випрямного діода.

2.2. Автоматизація процесу отримання прямої гілки ВАХ випрямного діода – дослідження ВАХ за допомогою схеми характеріограф.

Перелік приладів:

- осцилограф;
- функціональний генератор;
- випрямляючий діод 1N4001;
- опір навантаження 100 Ом.

Зібрати схему рис. 1.8. Налаштувати генератор і осцилограф, як показано на рис. 1.9. Зверніть увагу, що формування ВАХ здійснюється в режимі розгортки В / А осцилографа, при цьому використовуються сигнали генератора і з навантаження діода.

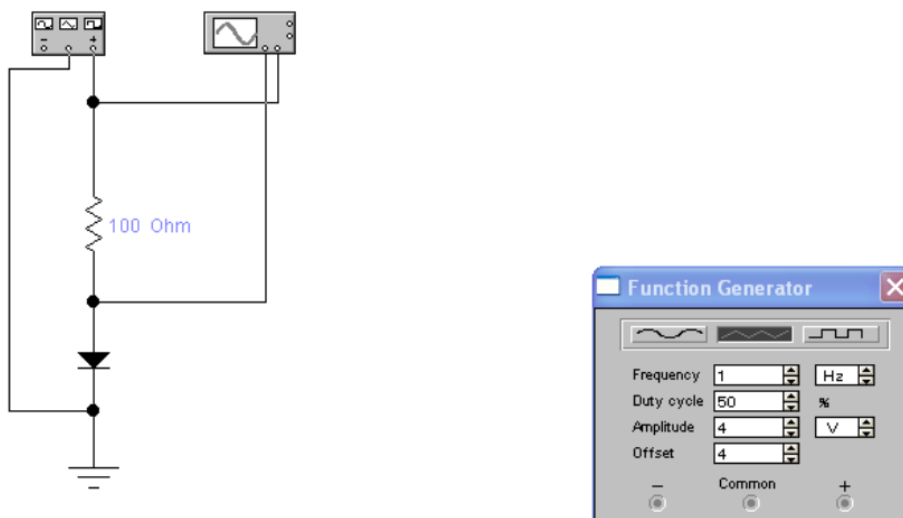


Рис. 1.8. Схема характеріограф для отримання ВАХ діода при прямому включенні

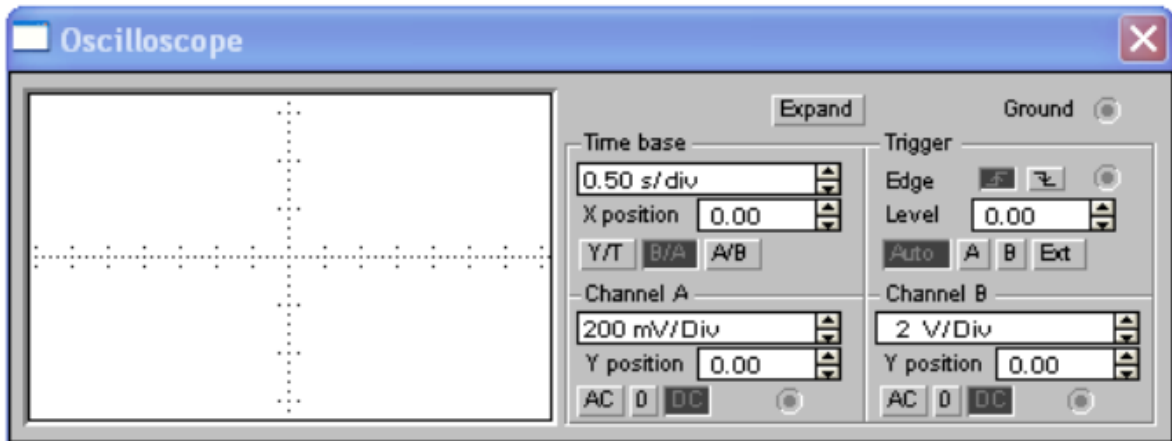


Рис. 1.9. Налаштування осцилографа для отримання ВАХ діода при прямому включенні

2.3. Побудова вольт-амперної характеристики діода в зворотному включенні.

Перелік приладів:

- джерело постійної напруги;
- випрямляючий діод 1N4001;
- амперметр;
- вольтметр.

Зібрати схему, показану на рис. 1.10. Задавати джерела напруги від 0 В до 50 В відповідно до табл. 1.2. Дані, отримані в результаті експерименту, записати в табл. 1.2 «Результати вимірювання зворотної гілки вольт-амперної характеристики діода».

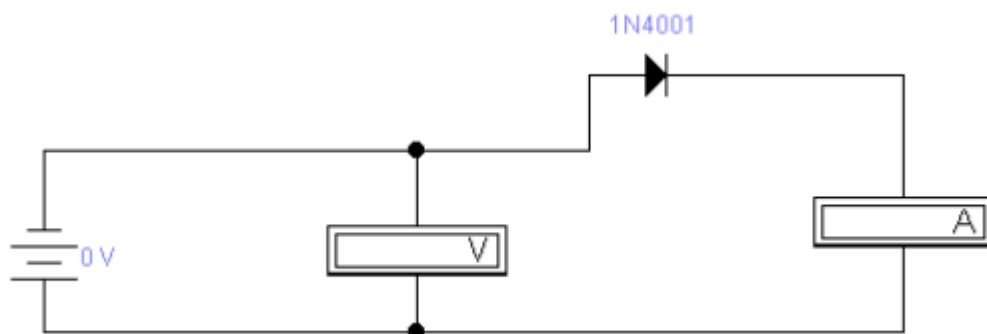


Рис. 1.10. Схема для отримання вольт-амперної характеристики діода при зворотному включенні

**Результати вимірювання зворотної гілки вольт-амперної
характеристики діода**

Uобр, В	0	10	20	30	40	49	49,5	49,6	49,7	49,8	49,9	49,95
Iобр. мкА												

За отриманими результатами побудувати ВАХ зворотної гілки випрямного діода.

Самостійно отримати зворотну гілку ВАХ за допомогою схеми характеріограф.

2.4. Побудова вольт-амперної характеристики стабілітрона.

Перелік приладів:

- джерело постійної напруги;
- стабілітрон 1N4733;
- амперметр;
- вольтметр.

Зібрати схему, показану на рис. 1.11. Змінюючи вхідну напругу, фіксувати показання амперметра і другого вольтметра.

Результати вимірювань занести в табл. 1.3 «Результати вимірювання вольт-амперної характеристики стабілітрона».

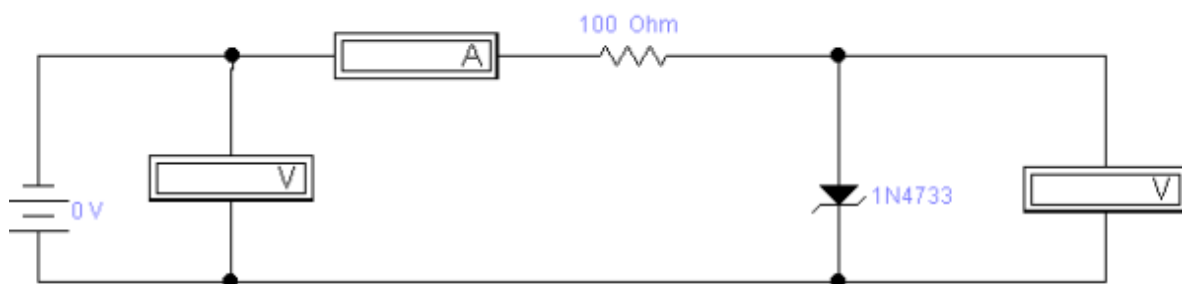


Рис. 1.11. Схема для отримання вольт-амперної характеристики стабілітрона

Результати вимірювання вольт-амперної характеристики стабілітрона

Uвх	0	1	2	4	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Uвих																
Iвих																

За результатами табл. 1.3 побудувати зворотну гілку ВАХ стабілітрона.

2.5. Завдання до лабораторної роботи:

- Написати конспект коротких теоретичних відомостей про напівпровідникові діоди і стабілітрони.
- Під час виконання лабораторної роботи замалювати всі досліджувані схеми, таблиці вимірювань і вольт-амперні характеристики.
- Письмово відповісти на контрольні запитання.
- Надати звіт викладачеві.
- Захистити лабораторну роботу.

Контрольні запитання

1. Поясніть процес утворення запірного шару в р-n-переході.
2. Поясніть виникнення струму через р-n-перехід у разі підключення діода в прямому напрямку.
3. Поясніть виникнення струму через р-n-перехід у разі підключення діода у зворотному напрямку.
4. Яким чином виникає лавинний і тепловий пробій р-n-переходу?
5. З якою метою в стабілізаторі напруги встановлюється баластний резистор?

Лабораторна робота № 2

Дослідження вхідних та вихідних статичних характеристик біполярного транзистора

Мета роботи – дослідити вхідні та вихідні статичні характеристики біполярного транзистора, підключеного за схемою зі спільним емітером; експериментально визначити параметри транзистора в статичному та динамічному режимах.

1. Теоретичні відомості

Транзистор уявляє собою напівпровідниковий прилад з одним або кількома р-n-р-переходами, який може бути використаний для підсилення потужності електричних сигналів. Існують різні види транзисторів. Найбільше використання має біполярний транзистор.

Основа біполярного транзистора – кристал германія або кремнія, в якому є три ділянки, що мають різний тип пропускання струму. Крайні ділянки зветься емітером та колектором. Вони завжди мають один тип пропускання струму. Біполярні транзистори бувають р-п-р та п-р-п типів (рис. 2.1). Фізичні процеси, що існують в них, аналогічні. Розглянемо принцип дії біполярного транзистора на прикладі транзистора р-п-р.

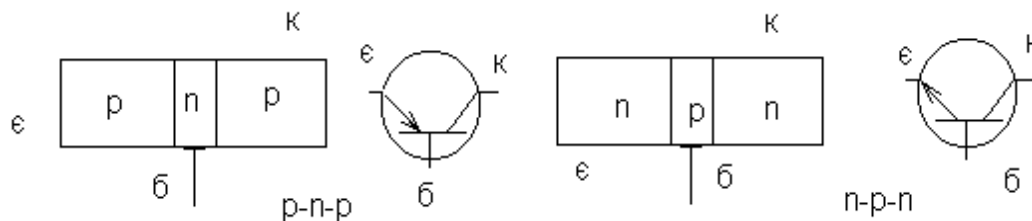


Рис. 2.1. Структура біполярних транзисторів

Принцип дії біполярного транзистора

Під час виготовлення біполярного транзистора необхідно виконати дві умови:

1. Ділянка бази повинна бути дуже тонкою (долі мікрметрів).
2. Концентрація основних носіїв повинна бути в емітері на декілька порядків більша за концентрацію основних носіїв у базі ($D_{PE} \gg N_{NB}$).

Для того, щоб транзистор міг працювати в режимі підсилення електричних сигналів, необхідно мати два джерела напруги U_1 та U_2 .

В активному режимі джерело U_1 підключають до емітерного переходу в прямому напрямку (емітерний перехід відкритий), джерело U_2 – до колекторного переходу в зворотному напрямку (колекторний перехід закритий) (рис. 2.2).

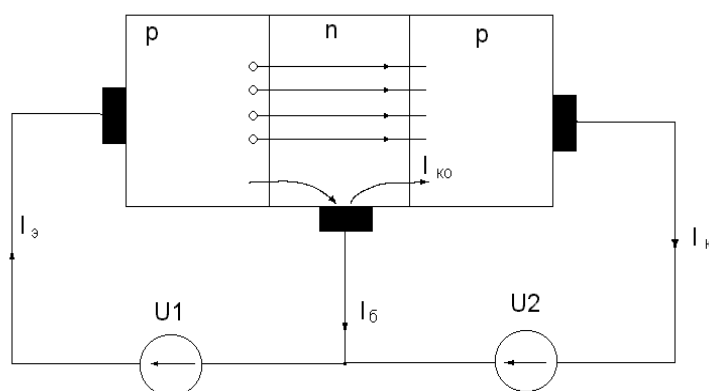


Рис. 2.2. Схема включення біполярного транзистора

Оскільки емітерний перехід відкритий, опір його малий і через нього протікає струм, що виникає шляхом переходу дірок з емітера до бази та

електронів з бази до емітера. Якщо здійснюється друга умова ($D_{PE} \gg N_{NB}$), можна вважати, що практично весь струм еміторного переходу (струм емітера транзистора) виникає за рахунок дірок, що перейшли з емітера до бази. Дірки, що перейшли з емітера до бази завдяки різниці концентрацій, починають дифундувати крізь ділянку бази вбік колектора. Для ділянки бази дірки є неосновними носіями заряду. Зустрічаючись в базі з електронами, вони повинні рекомбінуватися з ними. Для того, щоб електрон зустрівся з діркою та рекомбінувався з нею, необхідний якийсь час. У зв'язку з тим, що база виготовляється дуже тонкою (вимога 1), більшість дірок встигають пройти її, не встигнувши рекомбінуватись. Але невелика кількість дірок все ж таки встигає рекомбінуватись в базі з електронами. Ці електрони створюють струм бази транзистора I_B .

Більша частина дірок, що вийшла з емітера, встигають дійти до колекторного переходу. Електричне поле колекторного р-п-переходу є прискорюючим для неосновних носіїв бази (в даному випадку для дірок). Тут вони підхоплюються його полем та переходять до ділянки колектора. Для їх нейтралізації від джерела U_2 до колектора надходять електрони, які створюють струм колектора I_K .

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що для транзистора здійснюється другий закон Кірхгофа: $I_E = I_B + I_K$.

Впливаючи на будь-який з цих струмів, тим самим впливаємо і на інші два струми. Як правило, впливають на струм бази I_B , який в транзисторі має мінімальне значення. При цьому пропорційно змінюються струми I_E та I_K , які значно більші. Таким чином, транзистор здійснює підсилення струму.

Взаємозв'язок між струмами транзистора виражають через такі коефіцієнти:

- коефіцієнт передачі струму емітера $\alpha = \Delta I_K / \Delta I_E$ (0,9..0,99);
- коефіцієнт передачі струму бази $\beta = \Delta I_K / \Delta I_B$ (10..100).

Використовуючи надані коефіцієнти, можна записати:

$$I_K = \alpha I_E.$$

Але більш точним є вираз

$$I_K = \alpha I_E + I_{K0},$$

де I_{K0} – тепловий (зворотний) струм колекторного переходу, викликаний переходом неосновних носіїв з бази до колектора та з колектора до бази. Оскільки концентрація неосновних носіїв значно менша, ніж основних, струм I_{K0} при кімнатній температурі дуже малий. Але при підвищенні

температури швидко зростає (зростає приблизно в два рази кожні 10 градусів). Оскільки цей струм некерований (не залежить від струму емітера), при підвищених температурах він заважає нормальній роботі транзисторних схем.

Під час використання транзистора в електронних схемах на його вхід подається сигнал, що потрібно підсилити, а з виходу знімається підсилений. Для подавання вхідного сигналу необхідно два електроди. Для зняття підсиленого сигналу також необхідно два електроди. Оскільки у транзистора тільки три електроди, один з них завжди є спільним для вхідного та вихідного сигналів. Залежно від того, який електрод є спільним, розрізняють три схеми включення транзистора:

- 1) схема зі спільною базою (СБ);
- 2) схема зі спільним колектором (СК);
- 3) схема зі спільним емітером (СЕ).

Найбільше використання має схема зі спільним емітером СЕ, оскільки вона забезпечує найбільше підсилення сигналу по потужності та напрузі.

Характеристики та параметри біполярного транзистора

Оскільки біполярний транзистор має три зовнішніх електроди, то можна зняти декілька вольт-амперних характеристик (вхідну, вихідну та інші). ВАХ знімаються між двома будь-якими електродами, але її вигляд буде залежати від того, що подається на третій електрод. У зв'язку з цим ВАХ транзистора буде являти собою не одну характеристику, а сім'ю (рис. 2.3). Для схеми включення транзисторів СЕ вхідний сигнал впливає між базою та емітером, а вихідний сигнал знімається між емітером та колектором. З цього виникає залежність $I_B = f(U_{EB})$, а вихідною характеристикою $I_K = f(U_{EK})$. Ці характеристики зображені на рис. 2.3. Як бачите, вхідна характеристика мало залежить від вихідної напруги U_{KE} . Тому в довідниках наводять дві вхідні характеристики, що відповідають нульовій та робочій напрузі U_{KE} . Вихідні характеристики свідчать про те, що струм колектора транзистора (вихідний струм) мало залежить від вихідної напруги U_{KE} , а визначається напругою бази (вхідним струмом). Також транзистор характеризується більшою кількістю інших параметрів:

- $U_{KE \text{ макс}}$ – максимальна напруга між колектором та емітером;
- $I_{K \text{ макс}}$ – максимальний струм колектора;
- $P_{K \text{ макс}}$ – максимальна потужність, що розсіюється транзистором;
- I_{K0} – зворотний (тепловий) струм колектора;

$f_{\text{макс}}$ – максимальна робоча частота транзистора.

$T_{\text{макс}}$ – максимальна робоча температура (для германійових транзисторів $+85^{\circ}\text{C}$, для кремнійових $+125^{\circ}\text{C}$).

Розглянуті характеристики називають статичними. Вони характеризують транзистор як прилад. Для того, щоб за допомогою транзистора отримати підсилений сигнал за напругою, в його колекторне коло необхідно включити резистор навантаження R_K (рис. 2.4). Для цього кола за другим законом Кірхгофа можна записати:

$$E_K = U_{KE} + U_K = U_{KE} + I_K R_K.$$

З якого отримуємо:

$$I_K = E_K/R_K - U_{KE}/R_K.$$

Це рівняння зветься рівнянням динамічної навантажувальної характеристики. Оскільки рівняння є лінійне, динамічну навантажувальну характеристику можливо побудувати за допомогою двох точок (рис. 2.5).

1) при $I_K = 0$, $U_{KE} = E_K$;

2) при $U_{KE} = 0$, $I_K = E_K/R_K$.

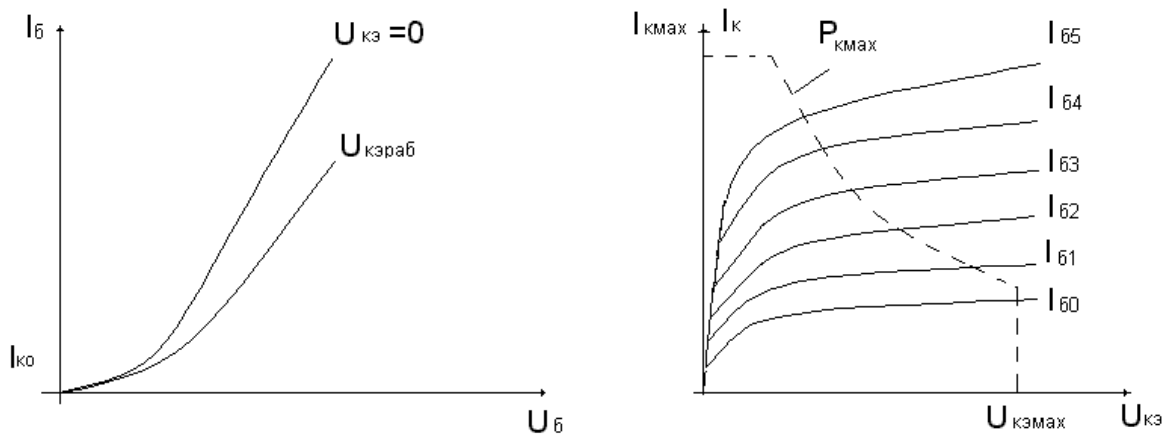


Рис. 2.3. ВАХ біполярного транзистора

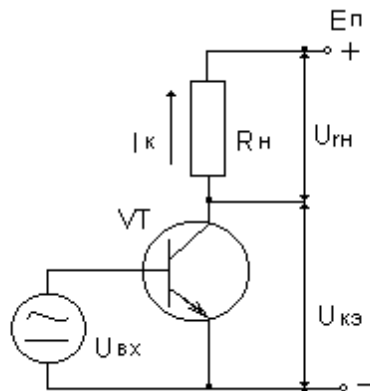


Рис. 2.4. Включення біполярного транзистора для підсилення електричних сигналів

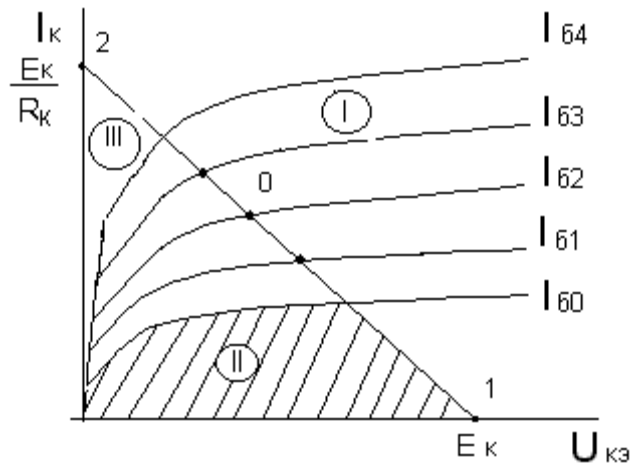


Рис. 2.5. Режими роботи біполярного транзистора

Динамічна навантажувальна характеристика транзистора будується на вихідних статичних характеристиках. Точка перетинання динамічної навантажувальної характеристики з відповідною статичною характеристикою (визначається заданим струмом бази I_B) зветься робочою точкою транзистора.

У процесі роботи при зміні вхідного сигналу (струму бази) робоча точка може знаходитись в трьох ділянках (режимах) (рис. 2.5).

Активна ділянка (I). В даному режимі емітерний перехід відкритий, колекторний перехід зачинений. Виконується умова:

$$I_K = I_B + (\beta + 1)I_{K0}.$$

Ділянка відсіку (II). В цьому режимі емітерний та колекторний переходи зачинені. В колі колектора тече незначний струм $I_K = I_{K0}$ (тепловий струм). Транзистор зачинений.

Ділянка насичення (III). В цьому режимі емітерний та колекторний переходи відкриті. Для даного режиму:

$$I_K < \beta I_B; \quad I_K = E_K/R_K.$$

Транзистор повністю відкритий і його опір мінімальний. Струм стримується тільки опором резистора R_K . В лінійних підсилювачах транзистор працює в активному режимі. Якщо в процесі роботи транзистор знаходиться в режимі насичення та відсіку, такий режим зветься імпульсним, або ключовим. Він використовується в імпульсних та цифрових приладах.

2. Порядок виконання лабораторної роботи

2.1. Дослідження входних характеристик транзистора.

Перелік приладів:

- джерело постійної напруги – 2 – шт.;
- змінний резистор (100 Ом);
- вольтметр – 2 шт.;
- амперметр;
- біполярний транзистор 2N2218.

Складіть схему для зняття входних вольт-амперних характеристик біполярного транзистора (рис. 2.6).

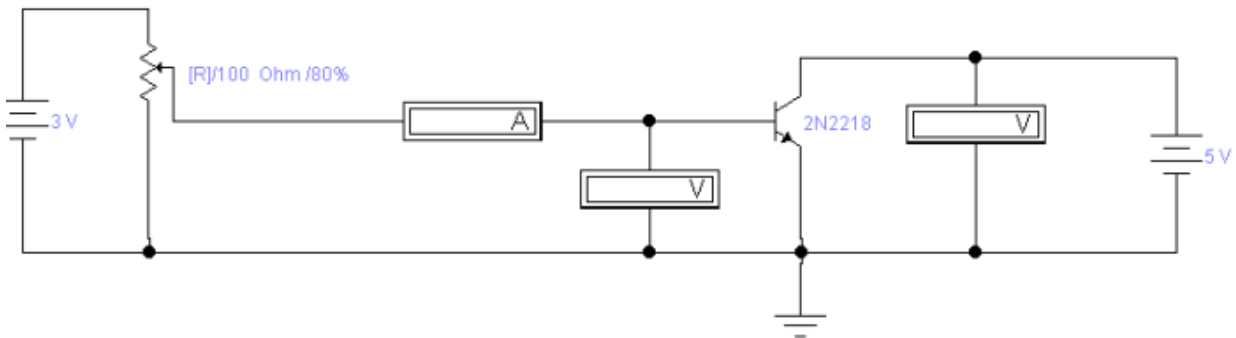


Рис. 2.6. Схема для зняття входних вольт-амперних характеристик біполярного транзистора

Зніміть входні характеристики транзистора $I_b = f(U_{be})$, $U_{ce} = \text{const}$.

Дослідження провести таким чином:

1) Напругу джерела живлення колектор-емітер встановити рівною 0 В, а величину струму бази змінювати шляхом зміни номінального значення змінного резистора (від 0% до 100% з кроком в 20%). На кожному кроці знімати показання вольтметра емітер-база і амперметра. Отримані значення навести в рядки 1 та 2 в табл. 2.1.

2) Встановити напругу джерела живлення колектор-емітер, рівною 5В і повторити ті ж дії Отримані результати занести в третій рядок табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Дослідження входних характеристик транзистора

$U_{BE}, \text{В}$							$U_{CE}, \text{В}$
$I_{B1}, \text{мкА}$							0
$I_{B2}, \text{мкА}$							5

2.2. Дослідження вихідних характеристик транзистора.

Перелік приладів:

- джерело постійної напруги – 2 шт.;
- змінний резистор (100 Ом);
- вольтметр – 2 шт.;
- амперметр;
- біполярний транзистор 2N2218.

Складіть схему для зняття вихідних вольт-амперних характеристик біполярного транзистора (рис. 2.7).

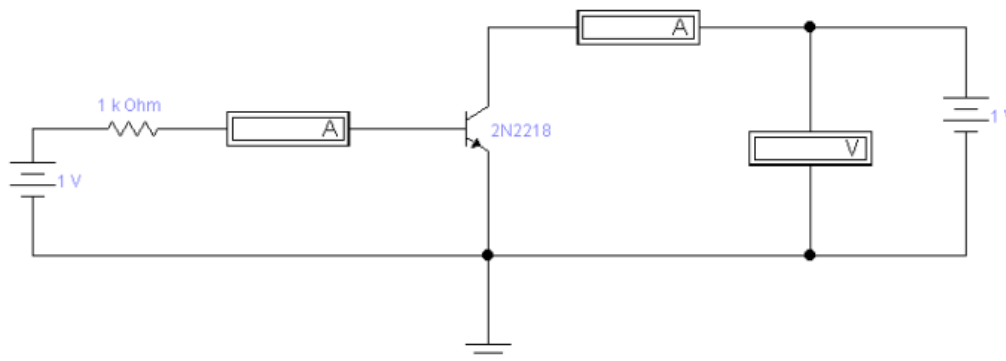


Рис.2.7. Схема для зняття вихідних вольт-амперних характеристик біполярного транзистора

Зніміть вихідні характеристики транзистора $I_K=f(U_{KE})$, $I_B=\text{const}$ таким чином:

1) Встановити значення струму бази (показання амперметра в колі бази) шляхом зміни номінального значення опору. При цьому слід враховувати, що номінальні значення опору резистора необхідно підбирати такими, щоб струм бази відповідав заданим в табл. 2.2 значенням (підбір виконувати за будь-яких значень U_{KE} , крім 0). Величини підібраних номінальних значень опорів внести в колонку R.

2) Змінюючи величину напруги джерела живлення колектор-емітер від 0 В до 5В, фіксувати показання амперметра в колекторному колі і ці дані внести в табл. 2, рядок 2. Потім встановлюються наступні значення струмів бази і досліди повторюються.

Таблиця 2.2

Дослідження вихідних характеристик транзистора

$U_{KE}, \text{В}$	0	1	2	3	4	5	R	$I_B, \text{мА}$
$I_{K1}, \text{мА}$								200
$I_{K2}, \text{мА}$								300
$I_{K3}, \text{мА}$								400

2.3. За даними табл. 2.1 і 2.2 побудувати сімейство вхідних і вихідних характеристик транзистора.

2.4. За вихідною характеристикою визначте коефіцієнт передачі струму транзистора, включеного за схемою з загальним емітером.

2.5. Зробити висновки за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Які вимоги повинні бути виконані під час виготовлення транзистора і чому?

2. Чому в транзисторі носії заряду, що потрапили до бази з емітера, вільно проходять з бази до колектора, не дивлячись на те, що колекторний перехід зачинений?

3. Чому виникає струм I_{K0} та від чого залежить його значення?

4. В чому різниця статичних та динамічних характеристик транзистора?

5. Як визначити параметр β за знятими характеристиками?

6. Основні режими роботи транзистора. Чим вони відрізняються?

Лабораторна робота №3

Транзисторний підсилювач з ємнісним зв'язком

Мета роботи: дослідити транзисторний підсилювач, ввімкненого за схемою з загальним емітером, вивчити характеристики RC-підсилювача (схема зі спільним емітером).

1. Теоретичні відомості та пояснення до виконання роботи

Підсилювачем називається пристрій для збільшення потужності електричних сигналів. Потужність вихідного сигналу по відношенню до потужності вхідного сигналу збільшується за рахунок енергії джерела струму.

Принцип підсилення полягає в тому, що малопотужний вхідний сигнал керує потоком енергії значно більшої потужності, що надходить від джерела енергії, в навантаження. Між джерелами струму і навантаженням ввімкнено підсилюючий елемент, опір якого змінюється під дією вхідного сигналу.

Основні параметри підсилювача:

1) Коефіцієнт підсилення – це відношення вихідного параметра до вхідного.

$K_U = U_{\text{ВИХ}}/U_{\text{ВХ}}$ – коефіцієнт підсилення по напрузі.

$K_I = I_{\text{ВИХ}}/I_{\text{ВХ}}$ – коефіцієнт підсилення по струму.

$K_P = P_{\text{ВИХ}}/P_{\text{ВХ}}$ – коефіцієнт підсилення по потужності.

2) Вхідний опір – це опір між вхідними клемми підсилювача для змінного струму.

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}/I_{\text{ВХ}}.$$

3) Вихідний опір – це опір між вихідними клемми підсилювача для змінного струму.

$$R_{\text{ВИХ}} = U_{\text{ВИХ}}/I_{\text{ВИХ}}.$$

4) Коефіцієнт корисної дії (ККД) підсилювача – це відношення потужності, яка надходить до навантаження к потужності, що отримується від джерела струму.

$$\eta = P_{\text{Н}}/P_{\text{ДС}}.$$

Основні характеристики підсилювача:

1. Амплітудна характеристика $U_{\text{ВИХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$.

2. Амплітудно-частотна характеристика $U_{\text{ВИХ}} = f(F)$.

3. Фазо-частотна характеристика $\varphi = f(F)$.

У загальному випадку вихідна напруга $U_{\text{ВИХ}}$ і струм підсилення $I_{\text{ВИХ}}$ зсунуті по фазі відносно вхідної напруги і струму $I_{\text{ВХ}}$. В зв'язку з цим коефіцієнт підсилення по напрузі і струму є в загальному випадку величиною комплексною, яка характеризується модулем і фазою:

$$K_U = U_{\text{ВИХ}}/U_{\text{ВХ}}, K_I = I_{\text{ВИХ}}/I_{\text{ВХ}}.$$

Модуль коефіцієнта підсилення залежить від частоти підсилювального сигналу.

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) – це залежність модуля коефіцієнта підсилення підсилювача від частоти підсилювального сигналу.

Фазо-частотна характеристика (ФЧХ) – це залежність фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами від частоти.

Приклад АЧХ надано на рис. 3.1.

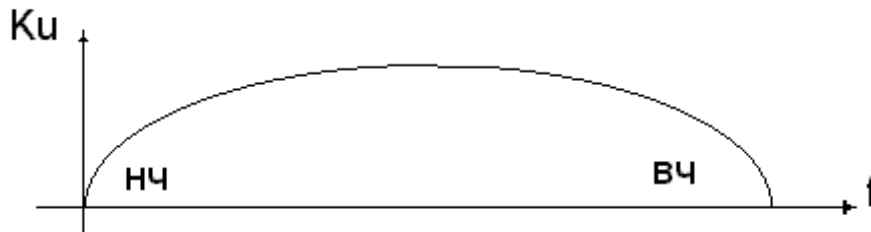


Рис. 3.1. АЧХ підсилювача

Унаслідок наявності в схемі підсилювача реактивних елементів, а також частотних властивостей транзистора коефіцієнт підсилення підсилювача має різні значення на різних частотах. Це явище називають частотним спотворенням.

Для його оцінки вводиться параметр – коефіцієнт частотних спотворень M , рівний відношенню коефіцієнта підсилювання на середніх частотах (СЧ) K_{U0} до коефіцієнта підсилювання на даній частоті K_{Uf} :

$$M = K_{U0}/K_{Uf}.$$

Частоти, на яких коефіцієнт спотворення M досягає максимального значення, називається верхньою f_B і нижньою f_H граничними частотами. Різниця

$$F = f_B - f_H$$

називається смугою пропускання підсилювача. Часто M приймають рівним: $\sqrt{2} = 1,41$.

Амплітудна характеристика підсилювача – це залежність амплітуди вихідного сигналу від амплітуди вхідного.

Для ідеального підсилювача амплітудна характеристика становить пряму лінію, що проходить через початок координат. Амплітудна характеристика реального підсилювача співпадає з характеристикою ідеального тільки на відрізку АВ (рис. 3.2). При великих вхідних сигналах $U_{ВХ} > U_{ВХ \text{ МАКС}}$ або дуже малих $U_{ВХ} < U_{ВХ \text{ МИН}}$ вихідна напруга підсилювача перестає зростати. Це пов'язано з тим, що в режимі великих вхідних сигналів робоча точка транзистора заходить в режим насичення, а в режимі малих вхідних сигналів робоча точка транзистора заходить в режим відсічки (виявляються нелінійні властивості транзистора). При цьому вихідний сигнал спотворюється. Це явище називається напругою власних шумів підсилювача. Власні шуми підсилювача обумовлені різними

перешкодами і наводками, а також непостійністю електричних процесів. За допомогою підсилювача неможливо підсилити сигнали з амплітудою $U_{ВХ} < U_{ВХ\text{ МИН}}$, бо підсилений сигнал неможливо знайти у власних шумах підсилювача.

Відношення $U_{ВХ\text{ МАКС}}/U_{ВХ\text{ МИН}} = D$ називається динамічним діапазоном підсилювача.

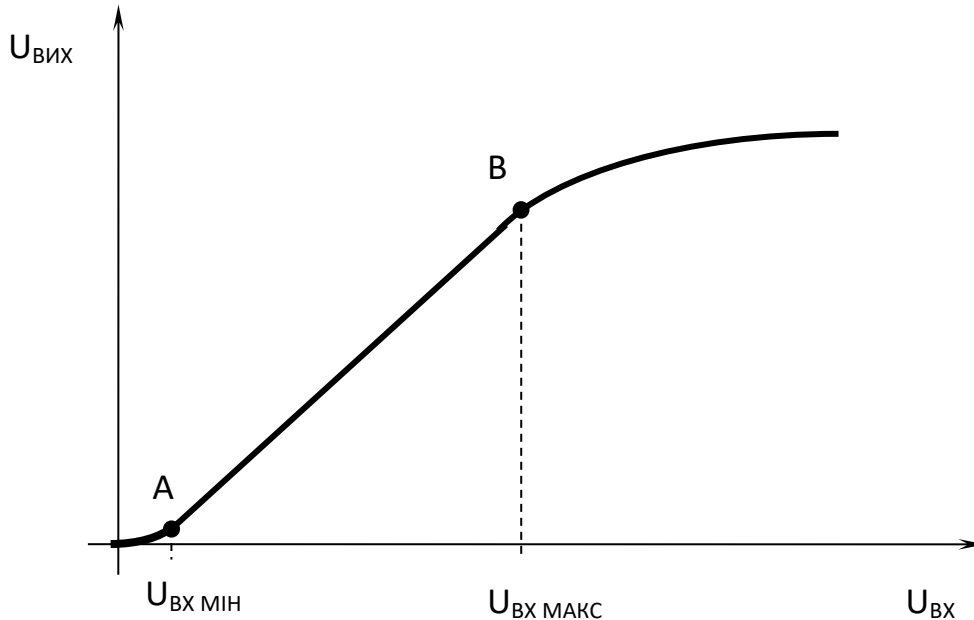


Рис. 3.2. АЧХ реального підсилювача

Найширше розповсюдження отримали підсилювачі, в яких транзистор ввімкнутий по схемі зі спільним емітером. Такі підсилювачі дають максимальний коефіцієнт підсилення по потужності K_p .

Підсилювач з резистивно-ємкісним зв'язком (RC-підсилювач) – це багатокаскадний підсилювач, в якому зв'язок між каскадами здійснюється через розподільні конденсатори. На рисунку 3.3 показана схема одного каскаду підсилення.

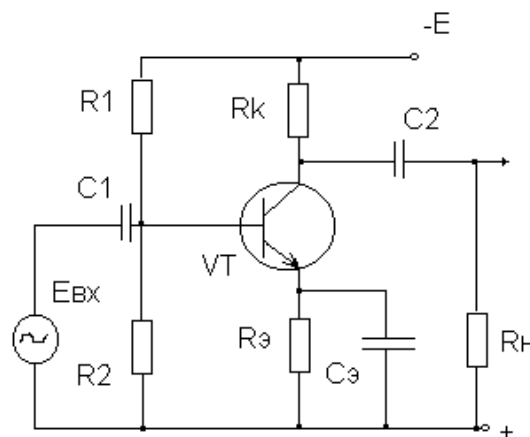


Рис. 3.3. Схема підсилювального каскаду

Основним елементом підсилюючого каскаду є транзистор VT, що забезпечує підсилення електричного сигналу. Резистори R1 та R2 є вхідним подільником напруги. Вони забезпечують режим роботи базового ланцюга по постійному струму, тобто визначають клас підсилювання підсилювача.

Опір R_K являє собою колекторне навантаження транзистора. За допомогою цього резистора задається режим роботи колекторного ланцюга транзистора по постійному струму. Резистор R_E забезпечує від'ємний зворотний зв'язок по постійному струму і установлений для термостабілізації робочої точки транзистора. Конденсатор C_E по змінному струму шунтує резистор R_E та відключає від'ємний зворотний зв'язок по змінному струму (для підсилювального сигналу).

Роздільчий конденсатор C_{P1} розділяє джерело вхідного сигналу $E_{ВХ}$ та вхід підсилювача по постійному струму. Оскільки конденсатор пропускає тільки змінний струм, на вхід підсилювача буде подаватись тільки змінна складова вхідного сигналу. Крім цього, постійна напруга з подільника R1R2 не буде впливати на режим роботи джерела вхідного сигналу $E_{ВХ}$. Застосування C_{P2} аналогічне. Цей роздільчий конденсатор розділяє вихід підсилювача та навантаження R_H по постійному струму. В результаті в навантаження буде подаватись тільки змінна складова підсиленого сигналу. Якщо підсилювач багатокаскадний, то навантаженням R_H буде вхідний опір наступного каскаду.

Принцип роботи транзисторного підсилювача полягає в тому, що при невеликій зміні вхідного сигналу, прикладений між базою та емітером транзистора, струм бази змінюється на деяке значення I_B . При цьому струм колектора змінюється на значно більше значення $I_K = \beta I_B$.

Навантаженням транзистора по змінному струму є резистори R_K та R_H , бо зміна складова струму колектора розділяється на резистори R_K та R_H , які по змінному струму включені паралельно. Таким чином, еквівалентний опір навантаження транзистора по змінному струму:

$$R_{H\text{ ЕКВ}} = R_K R_H / (R_K + R_H).$$

Принцип підсилювання найвиразніше можна показати на графіках характеристик транзистора (рис. 3.4).

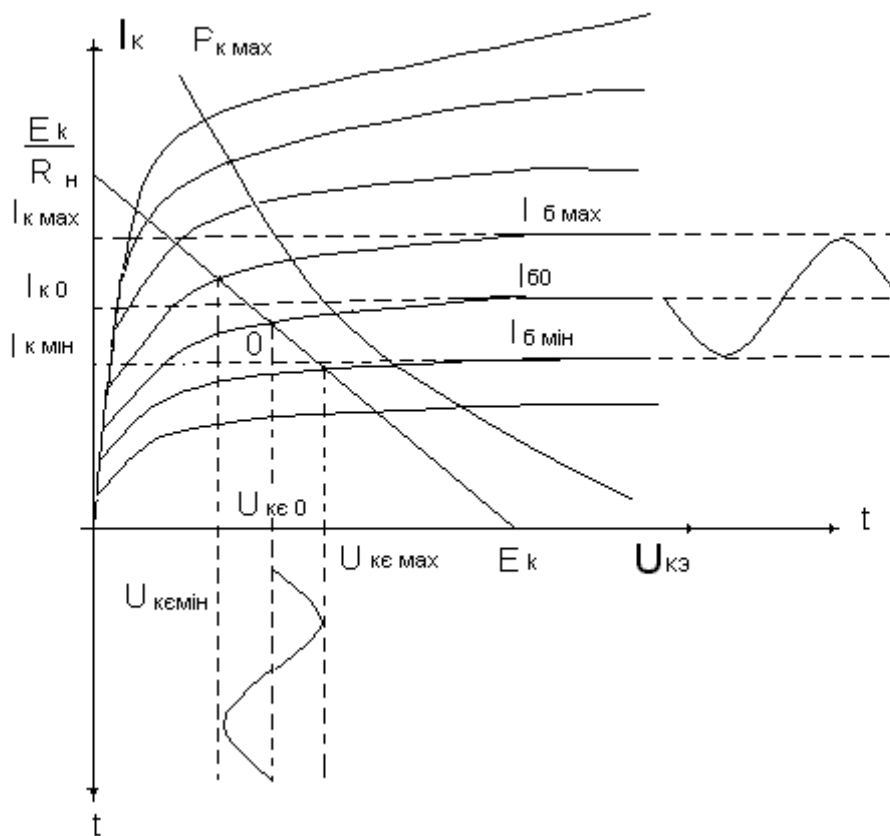


Рис. 3.4. Графіки характеристик транзистора

Режим роботи підсилювача та клас підсилення визначається вибором робочої точки O на вхідній та вихідній динамічних характеристиках транзистора. Для отримання максимальної вихідної потужності на навантаженні динамічна навантажувальна характеристика обирається таким чином, щоб вона знаходилася біля лінії максимально доведеного режиму $P_{k \text{ макс}}$, але не перетинала її. В режимі підсилення класу А робоча точка O обирається приблизно посередині динамічної навантажувальної характеристики. З графіків випливає, що підсилюючий каскад, зібраний за схемою зі спільним емітером, змінює фазу вихідної напруги U_{KE} по відношенню до вхідної U_{BE} на 180° . Побудовані графіки дають змогу визначити основні параметри підсилюючого каскаду:

$$R_{BX} = \Delta U_{BX} / \Delta I_{BX} = (U_{BE \text{ макс}} - U_{BE0}) / (I_{B \text{ макс}} - I_{B0}),$$

$$K_I = \Delta I_{ВИХ} / \Delta I_{BX} = (I_{K \text{ макс}} - I_{K0}) / (I_{B \text{ макс}} - I_{B0}),$$

$$K_U = \Delta U_{ВИХ} / \Delta U_{BX} = (U_{KE \text{ макс}} - U_{KE0}) / (U_{BE \text{ макс}} - U_{BE0}),$$

$$R_{ВИХ} = R_K.$$

Розглянута схема має АЧХ, показану на рис. 3.1. Зниження коефіцієнта підсилення на низьких частотах (НЧ) пов'язане з наявністю роздільних конденсаторів C_{P1} , C_{P2} , а також конденсатора C_E . При зниженні частоти опір конденсатора $X_C = 1/\omega C$ зростає. В результаті падіння напруги

на них збільшується. Це призводить до зменшення підсилюваної напруги на навантаженні. В області середніх частот (СЧ) опір конденсаторів C_{P1} , C_{P2} , C_E стає занадто малим і його можна не враховувати. В області високих частот (ВЧ) починають виявлятися частотні властивості транзистора і його коефіцієнт підсилення падає. Розглянута схема підсилюючого каскаду має хороші якісні показники і знаходить широке застосування як частина різних транзисторних пристроїв.

2. Порядок виконання роботи

Перелік приладів:

- функціональний генератор;
- вольтметри для контролю напруг на електродах транзистора в статичному режимі (2 шт.);
- осцилограф;
- резистори (4 шт.);
- конденсатор;
- біполярний транзистор – 2N2218.

2.1. Зберіть схему для дослідження роботи підсилювача напруги на біполярному транзисторі, що включено за схемою з загальним емітером (рис. 3.5).

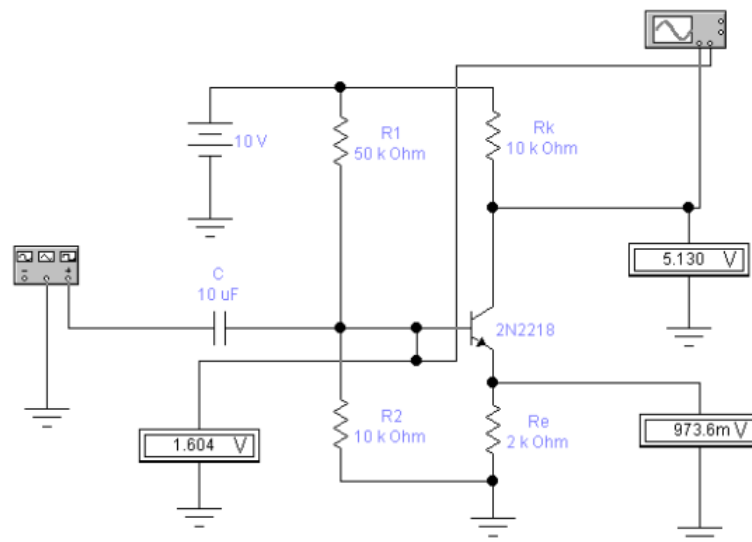


Рис. 3.5. Схема для дослідження роботи підсилювача напруги

2.2. Задайте значення функціонального генератора (рис. 3.6).

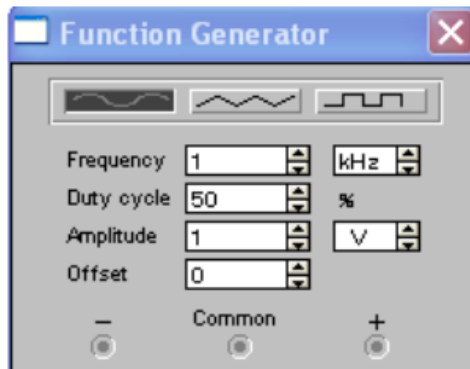


Рис. 3.6. Параметри функціонального генератора

2.3. При дослідженні осцилограми рекомендується встановити параметри відповідно до рис.3.7.

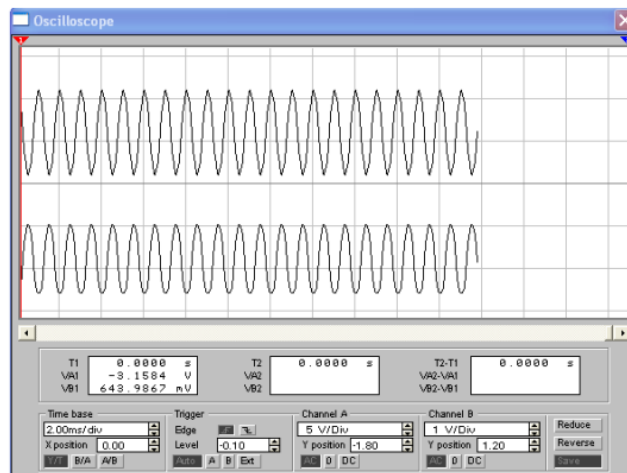


Рис. 3.7. Параметри осцилографа при дослідженні амплітудної характеристики підсилювача напруги

2.4. Зніміть амплітудну характеристику підсилювача для різних значень опорів навантаження в колі колектора (вхідна напругу змінювати в межах від 1 до 3В). Дані вимірювань внесіть в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Результати вимірювання амплітудної характеристики підсилювача напруги, зібраного за схемою із загальним емітером, що працює в режимі класу А

$U_{ВХ}, В$							$R_K,$ кОм	$f_{ВХ}$
$U_{ВИХ},$ В							10	1000 Гц
$U_{ВИХ},$ В							5	

2.5. За даними табл. 3.1 побудувати графічні залежності $U_{\text{вих}} = f(U_{\text{вх}})$ для різних опорів навантаження (дві криві на одному кресленні).

2.6. Зніміть частотну характеристику підсилювача для різних значень опорів навантаження в колі колектора. (Рекомендується частоту змінювати від 10 Гц). Дані вимірювань внесіть в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Результати вимірювання частотної характеристики підсилювача напруги, зібраного за схемою із загальним емітером, що працює в режимі класу А

										$R_{\text{к}},$ кОм	$U_{\text{вх}},$ В
$U_{\text{вих1}},$ В										10	1
$U_{\text{вих2}},$ В										5	

2.7. За даними табл. 3.2 побудувати графічні залежності $U_{\text{вих}} = f(\omega)$ для різних значень опорів навантаження (дві криві на одному графіку).

2.8. Визначте коефіцієнти підсилення за напругою по амплітудній характеристиці для лінійної і нелінійної частини для різних значень опорів колекторного навантаження.

2.9. Зробіть висновки про вплив величини колекторного навантаження на амплітудну і частотну характеристики підсилювача напруги.

Контрольні запитання

1. Поясніть принцип дії підсилювача напруги.
2. Для чого необхідний резистивний дільник в колі бази підсилювача?
3. З якою метою встановлюється резистор і конденсатор в емітерне коло підсилювача?
4. Яке призначення резистора в колі колектора?
5. Зобразіть амплітудну характеристику підсилювача напруги.
6. Чому частотна характеристика підсилювача має спад на низьких і високих частотах?

Лабораторна робота № 4

Дослідження роботи емітерного повторювача

Мета роботи: дослідити роботу транзистора, ввімкнутого по схемі зі спільним колектором, вивчити характеристики емітерного повторювача (схема зі спільним колектором).

1. Теоретичні відомості та пояснення до виконання роботи

Емітерний повторювач – це підсилюючий каскад, зібраний по схемі з загальним колектором. Схема емітерного повторювача показана на рис. 4.1.

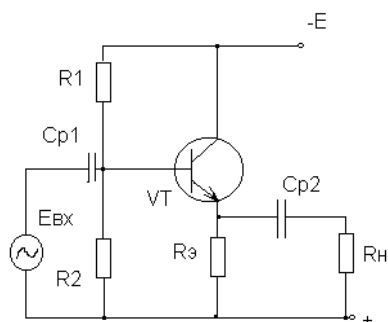


Рис. 4.1. Схема емітерного повторювача

Призначення основних елементів даної схеми аналогічне попередній. Різниця полягає в наступному: резистор R_E задає положення робочої точки вихідного кола транзистора; навантаженням транзистора за змінним струмом є паралельно ввімкнені опори R_H та R_E ; еквівалентний опір навантаження:

$$R_{H\text{ ЕКВ}} = R_H R_E / (R_H + R_E);$$

Вихідна напруга підсилювача дорівнює:

$$U_{\text{ВИХ}} = U_{\text{ВХ}} - U_{\text{БЕ}}.$$

Оскільки напруга $U_{\text{БЕ}}$ дуже мала, то можна вважати, що $U_{\text{ВИХ}} = U_{\text{ВХ}}$. Таким чином, емітерний повторювач не підсилює напругу ($K_U = 1$). Але схема забезпечує підсилення струму, бо:

$$I_E = (\beta + 1)I_B.$$

Отже, емітерний повторювач забезпечує підсилення струму і потужності.

В схемі емітерного повторювача немає шунтуючого конденсатора C_E . Таким чином, вся вихідна напруга виділяється на резисторі R_E . По відношенню до переходу база-емітер транзистора ця напруга включена послідовно та зустрічно з вхідною напругою. Таким чином, в схемі немає

стовідсоткового послідовного від'ємного зворотного зв'язку по вихідній напрузі. В зв'язку з цим емітерний повторювач має великий вхідний та малий вихідний опір. Вказані властивості емітерного повторювача визначають його застосування. Емітерний повторювач використовують як підсилювач струму або як елемент узгодження високоомного джерела вхідного сигналу з низькоомним навантаженням. У зв'язку з тим, що в емітерному повторювачі забезпечується глибокий від'ємний зворотний зв'язок, він адекватним чином впливає на параметри та характеристики підсилювача. Поліпшується амплітудно-частотна характеристика та смуга пропускання розширюється, зменшуються лінійні та нелінійні спотворення, але коефіцієнт підсилення по напрузі падає.

Володіючи малим вихідним і великим вхідним опором, емітерний повторювач знайшов широке застосування як узгоджувальний каскад під час роботи з високоомними джерелами сигналу.

Крім того, емітерний повторювач має широку смугу пропускання, що обумовлює малі частотні спотворення сигналу, а при посиленні імпульсних сигналів – малі величини спотворень вихідних імпульсів, зокрема тривалості фронту t_{ϕ} і спаду вершини Δ (рис. 4.2.).

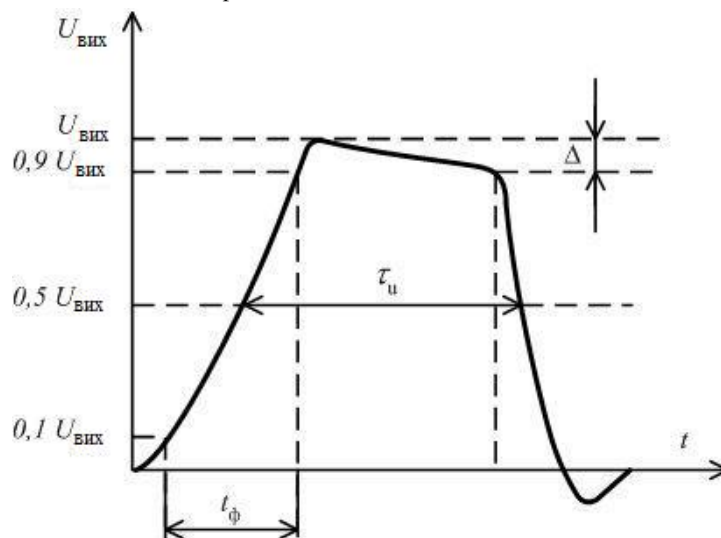


Рис. 4.2. Спотворення імпульсу на виході підсилювача

На формування фронту імпульсу на виході емітерного повторювача значний вплив має величина ємності навантаження C_n : чим більше C_n , тим більше t_{ϕ} .

У той же час на формування вершини вихідного імпульсу впливає ємність роздільного конденсатора C_p , а саме: чим менша величина C_p , тим більший спад вершини Δ вихідного імпульсу.

2. Порядок виконання роботи

Перелік приладів:

- функціональний генератор;
- вольтметри для контролю напруг на електродах транзистора в статичному режимі (2 шт.);
- осцилограф;
- резистори (4 шт.);
- конденсатори;
- біполярний транзистор – 2N2218.

2.1. Зберіть схему для дослідження роботи емітерного повторювача на біполярному транзисторі, що включено за схемою з загальним колектором (рис. 4.3).

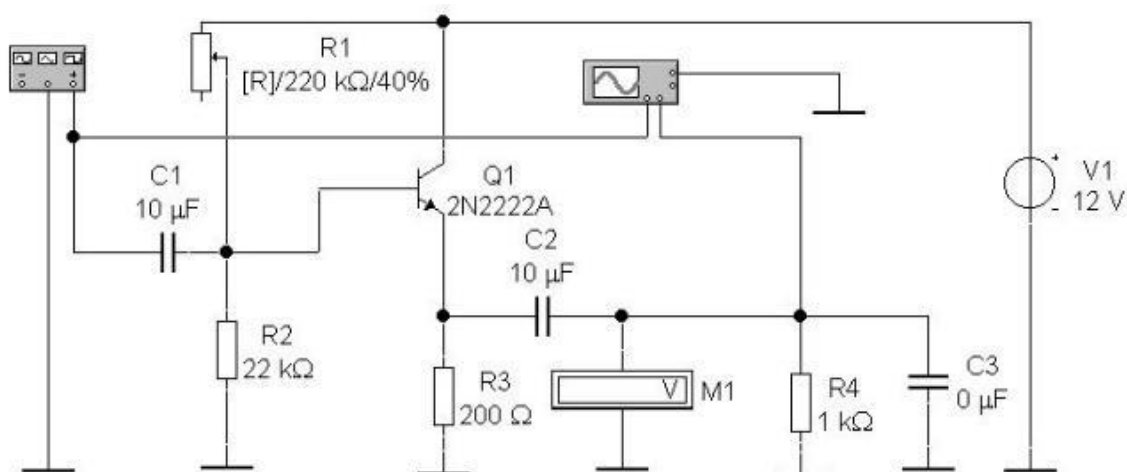


Рис. 4.3. Схема для дослідження роботи емітерного повторювача

2.2. Задайте значення функціонального генератора (рис. 4.4).

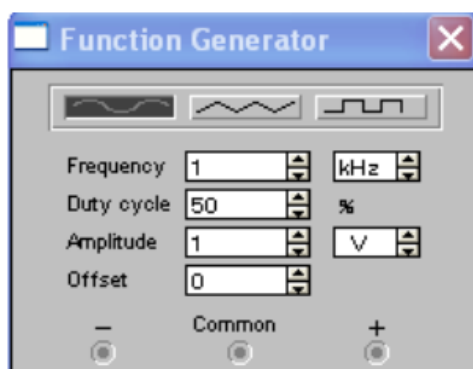


Рис. 4.4. Параметри функціонального генератора

2.3. Під час дослідження осцилограми рекомендується встановити параметри відповідно до рис. 4.5.

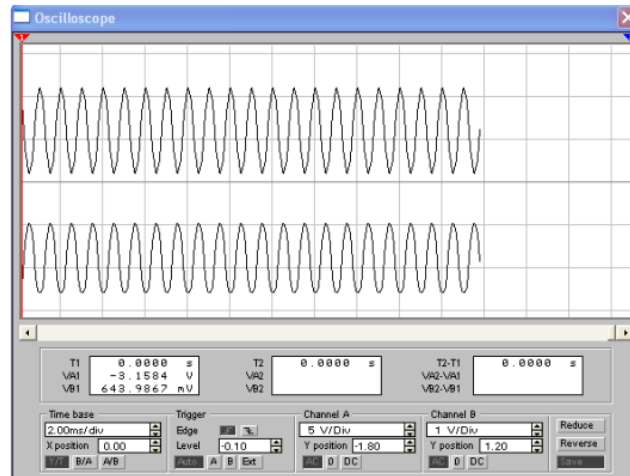


Рис. 4.5. Параметри осцилографа під час дослідження амплітудної характеристики емітерного повторювача

2.4. Зніміть амплітудо-частотну характеристику підсилювача для різних значень ємностей:

- $C1 = 10 \text{ мкФ}$ і $C2 = 0,1 \text{ мкФ}$. При цьому $C3 = 0$;
- $C1 = 0,033 \text{ мкФ}$ і $C3 = 0,1 \text{ мкФ}$. При цьому $C2 = 10 \text{ мкФ}$.

Рекомендується частоту змінювати від 10 Гц. Дані вимірювань внесіть в табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати вимірювання амплітудо-частотної характеристики емітерного повторювача

$f_{ВХ}$, кГц	0,05	0,1	0,5	1	5	10	50	100	250	500	$C1, C2,$ $C3$	$U_{ВХ}$, В
$U_{ВІХ1}$, В											10мкФ; 0,1мкФ; 0	1
$U_{ВІХ2}$, В											0,033; 0,1мкФ; 10мкФ	

2.5. За даними табл. 4.1 побудувати графічні залежності $U_{ВІХ} = f(\omega)$ для різних значень ємностей $C1, C2, C3$ (дві криві на одному графіку).

2.6. За частотними характеристиками визначити для RC-підсилювача:

- максимальний коефіцієнт підсилення на середніх частотах K_{U0} ;
- нижню межу частоту f_H та верхню межу частоту f_B на рівні $0,707K_{U0}$;
- смугу пропускання підсилювача $F = f_B - f_H$.

2.7. Дослідження режиму роботи емітерного повторювача з імпульсними сигналами:

- 1) До входу емітерного повторювача підключіть генератор прямокутних імпульсів та осцилограф. Встановіть амплітуду вхідного імпульсу $U_{вх} = 1$ В і частоту 1 кГц.
- 2) Замалюйте осцилограму вхідної напруги.
- 3) Підключіть осцилограф до виходу схеми та замалюйте форму вихідної напруги для наступних значень ємності конденсатора C_2 : 10,0 мкФ; 0,033 мкФ; 0,1 мкФ; 1 мкФ; $C_3 = 0$. Визначте спад вершини імпульсу і тривалість фронтів. Оцініть вплив величини ємності на форму вихідного імпульсу.
- 4) Замалюйте форму вихідної напруги для наступних значень ємності конденсатора C_3 : 0,033 мкФ; 0,1 мкФ; 1 мкФ; $C_2 = 10$ мкФ. Оцініть вплив величини ємності C_2 на форму вихідного імпульсу емітерного повторювача.
- 5) Зробити висновки за результатами.

Контрольні запитання

1. Зобразіть схему емітерного повторювача і поясніть призначення елементів.
2. Чому дорівнює коефіцієнт передачі за напругою емітерного повторювача?
3. Чому дорівнює коефіцієнт посилення за струмом емітерного повторювача?
4. Які переваги і недоліки емітерного повторювача?
5. Які елементи схеми емітерного повторювача впливають на величину t_ϕ (фронт імпульсу) і як? Наведіть основні співвідношення.
6. Які елементи схеми емітерного повторювача визначають спад вершини імпульсу? Наведіть основні співвідношення.

7. Як впливає на хід амплітудно-частотної характеристики емітерного повторювача ємність конденсатора C_3 ?

8. Як впливає на хід АЧХ емітерного повторювача ємність конденсатора навантаження C_2 ?

9. Чому каскад із загальним колектором називають емітерним повторювачем?

Список літератури

1. *Воробйова О.М.* Основи схемотехніки : підручник / О.М. Воробйова, В.Д. Іванченко [2-ге вид.]. – Одеса : Фенікс, 2009.
2. *Колонтаєвський Ю.П.* Електроніка і мікросхемотехніка : підручник; 2-е вид. / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. А.Г. Соскова. – Київ : Каравела, 2009. – 416 с.
3. *Колонтаєвський Ю.П.* Промислова електроніка та мікросхемотехніка : теорія і практикум / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков; за ред. А.Г. Соскова. – Київ : Каравела, 2003. – 368 с.
4. *Гершунський Б.С.* Основы электроники и микроэлектроники : учебник. – Київ : Вища школа, 1987. – 422 с.
5. *Забродин Ю.С.* Промышленная электроника : учебник для вузов. – Москва : Высшая школа, 1982. – 496 с.

Навчально-методичне видання

ЕЛЕКТРОНІКА ТА МІКРОСХЕМОТЕХНІКА

Методичні вказівки
до виконання лабораторних робіт № 1–4
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
за спеціальностями 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка» та 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: **Луценко** Вадим Юрійович,
Волчков Максим Володимирович

Комп'ютерне верстання *Т.І. Кукарєвої*

Підписано до друку 4.09.2024. Формат 60 × 84_{1/16}
Ум. друк. арк. 2,09. Обл.-вид. арк 2,25.
Електронний документ. Вид. № 89/III–24.

Видавець і виготовлювач
Київський національний університет будівництва і архітектури

Проспект Повітряних Сил, 31, Київ, Україна, 03037

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.