

УДК 0053.08 (002.21)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМ. ТАРАСА ГРИГОРОВИЧА ШЕВЧЕНКА  
ФІЗИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

# ЗВІТ

до лабораторної роботи №4:  
«Дослідження ВАХ транзисторів»

Месюра М. С.

Київ, 2021

## РЕФЕРАТ

Звіт до ЛР №4: 28 с., 23 рис., 2 джерела.

ОСЦИЛОГРАФ, ТРАНЗИСТОРИ, МОДЕЛЮВАННЯ, ВАХ, P-N-ПЕРЕХІД, LTSPICE, ВИХІДНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Об'єкт дослідження — біполярні та уніполярні транзистори, залежність від часу їхня вольт-амперна характеристика.

Мета роботи — дослідити вихідні характеристики транзисторів різних типів.

Методи дослідження — в роботі використовуються:

- 1) одержання зображення ВАХ транзисторів на екрані двоканального осцилографа, що працює в режимі характериографа;
- 2) побудова ВАХ шляхом вимірювання певної кількості значень сили струму на колекторі, що відповідають певним значенням напруги (для певної сили струму бази або напруги) для біполярного транзистора та певної кількості значень сили струму стоку, що відповідають певним значенням напруги (для певних значень напруги між затвором і витокom) для польового транзистора, подання результатів вимірів у вигляді графіків.

Змодельовано транзистори біполярний, польовий. Використано математичне моделювання. Оброблено отримані результати.

## ЗМІСТ

Частина 1. Теоретичні відомості.	с.
I. Основні означення.....	4
II. Класифікація, будова та принцип роботи транзисторів.....	5
Частина 2. Виконання роботи.	
I. Біполярний транзистор	
1. Схема.....	6
2. Напруга на базі.....	7
3. $U_E$ , $U_K$ .....	9
4. ВАХ.....	11
II. Польовий транзистор	
1. Схема.....	12
2. Напруга на базі.....	13
3. ВАХ $U_E$ , $U_K$ .....	15
4. $I_K$ при 10 % .....	16
5. ВАХ.....	18
Висновки.....	19
Частина 3. Контрольні запитання.....	20
Джерела.....	28

## Частина 1. Теоретичні відомості.

### I. Основні означення.

**Транзистор** — керований нелінійний елемент, на основі якого можна створювати підсилювачі електричних сигналів. .

**Біполярний транзистор** — це напівпровідниковий прилад з двома  $p-n$ -переходами, що взаємодіють між собою, та трьома виводами, підсилювальні властивості якого зумовлені явищами інжекції (введення) та екстракції (вилучення) неосновних носіїв заряду.

**Вихідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) біполярного транзистора** — це залежність сили струму колектора  $I_K$  від напруги між колектором та емітером  $U_{KE}$  при певному значенні струму бази  $I_B$  (або напруги між базою та емітером  $U_{BE}$ ) в схемі зі спільним емітером.

**Польовий (уніполярний) транзистор** — це напівпровідниковий прилад, підсилювальні властивості якого зумовлені струмом основних носіїв, що течуть по провідному каналу, провідність якого керується зовнішнім електричним полем.

**Польовий транзистор з керувальним електродом** — це польовий транзистор, керування струмом основних носіїв у якому здійснюється за допомогою  $p-n$ -переходу, зміщеного у зворотному напрямі.

**Вихідна вольт-амперна характеристика (ВАХ) польового транзистора** — це залежність сили струму стоку  $I_C$  від напруги між стоком та витоком  $U_{CB}$  при певному значенні напруги між затвором та витоком  $U_{зв}$ .

## II. Класифікація, будова та принцип роботи транзисторів.

Основна функція, яку виконує транзистор: за допомогою вхідного сигналу малої потужності керувати вихідним сигналом великої потужності. Існує два найпоширеніших різновиди транзисторів:

- біполярні;
- уніполярні (польові).

Біполярний транзистор — це сукупність двох  $p-n$ -переходів ( $p-n-p$  або  $n-p-n$ ). Одна з крайніх областей носить назву емітера, а інша — колектора, середню область називають базою. (База-)емітерний  $p-n$ -перехід включають у прямому напрямку, а (база-)колекторний  $p-n$ -перехід — у зворотному

Роботу біполярного транзистора зручно розглядати при включенні його за так званою схемою зі спільною базою, коли вивід бази є спільним для вхідного струму (напруги) та вихідного струму (напруги). Вихідним струмом транзистора в такій схемі є струм колектора  $I_K$ . Цей струм є нічим іншим як струмом неосновних носіїв, що протікає через  $p-n$ -перехід, увімкнений у зворотному напрямку (для  $p-n-p$  це струм дірок, для  $n-p-n$  — електронів). При нульовій різниці потенціалів між емітером і базою (закороченому вході транзистора) вихідна ВАХ збігається з ВАХ напівпровідникового діода, до якого прикладено напругу у зворотному напрямку. Характерною є слабка залежність струму колектора  $I_K$  від різниці потенціалів  $U_{KB}$ . Струм  $I_K$  залежить виключно від концентрації неосновних носіїв у базі поблизу колекторного переходу. Зміна концентрації неосновних носіїв у базі і, зокрема, біля колекторного переходу досягається їх введенням (емісією) в базу через емітерний перехід. Не всі введені носії заряду досягають колекторного переходу, оскільки в базовій області вони можуть рекомбінувати з основними носіями. При цьому в базу підтягуються електрони зі спільного виводу бази, тобто з бази витікає струм бази  $I_B$  (нагадаємо, що напрямок струму протилежний напрямку руху електронів).

Принцип роботи польових транзисторів дещо простіший. Польовий транзистор являє собою триелектродний прилад, в якому струм створюють основні носії заряду під дією повздовжнього електричного поля, а керування величиною цього струму здійснюється поперечним електричним полем, що створюється напругою, прикладеною до керувального електрода. За конструктивними особливостями всі польові транзистори поділяються на дві групи:

- польові транзистори з  $p-n$ -переходом;
- польові транзистори з ізольованим затвором.

## Частина 2. Виконання роботи.

### I. Біполярний транзистор.

#### 1. Схема.

Зібраний потенціометр використовуватимемо у трьох режимах: 99 % , 50 % , 10 % .

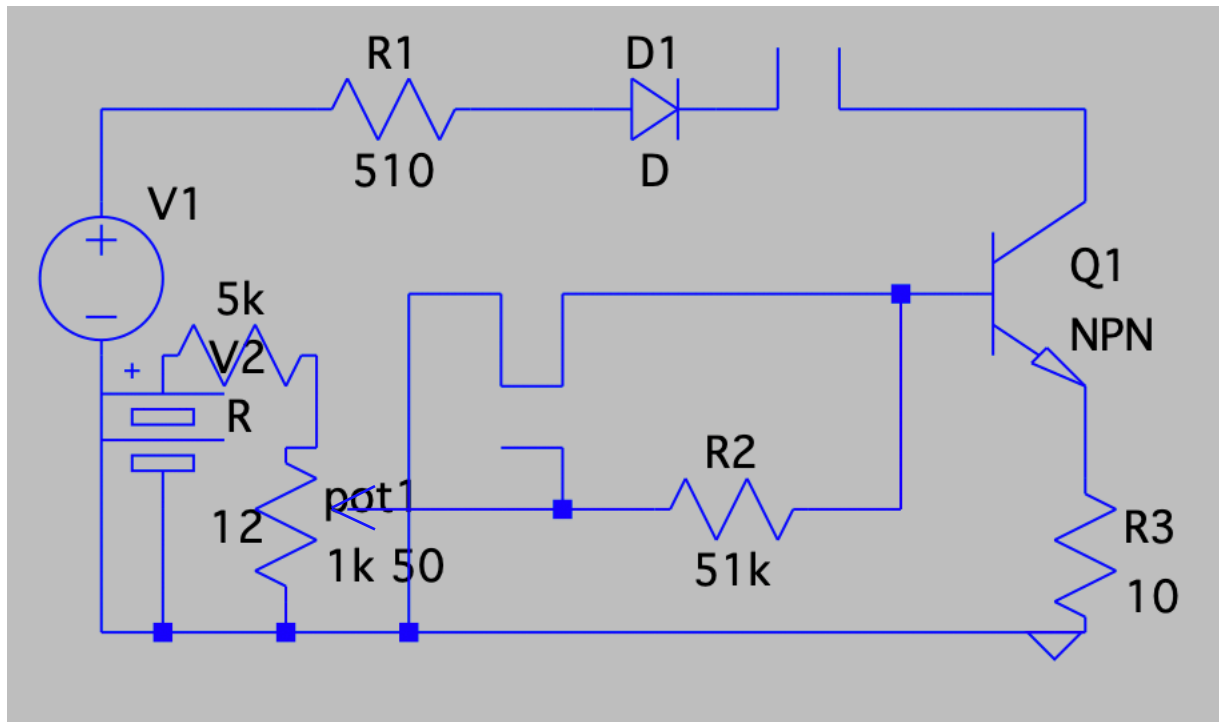


Рис. 1. Схема установки для дослідження ВАХ біполярного транзистора

## 2. Напруга на базі.

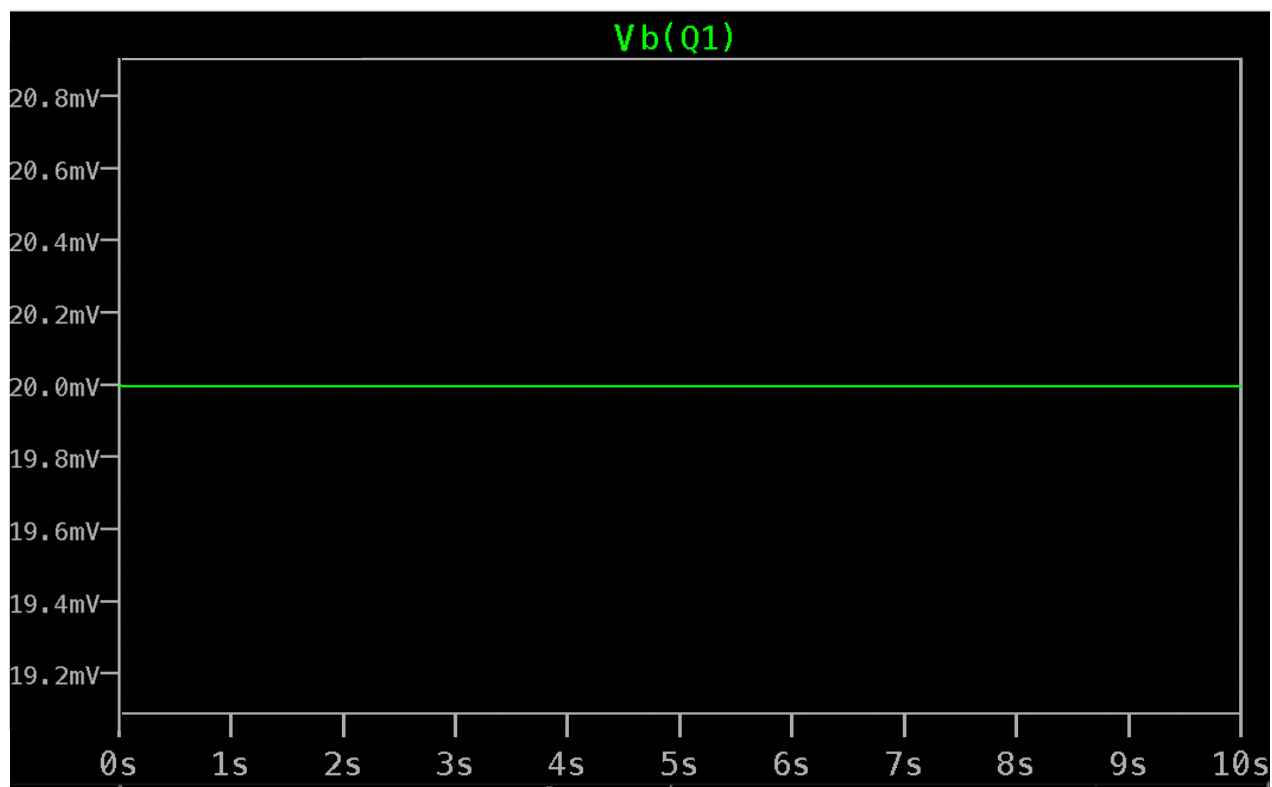


Рис. 2. Напруга на базі за 99 % потенціометра

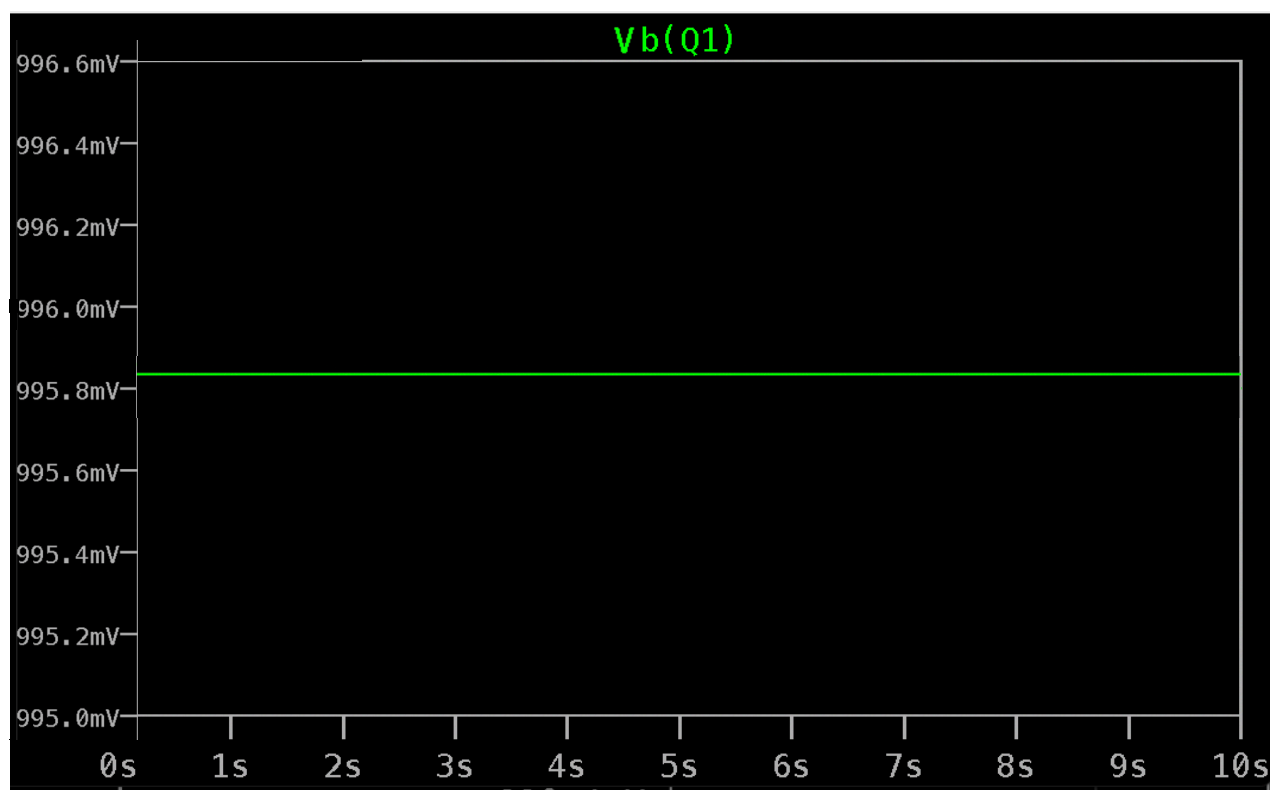


Рис. 3. Напруга на базі за 50 % потенціометра

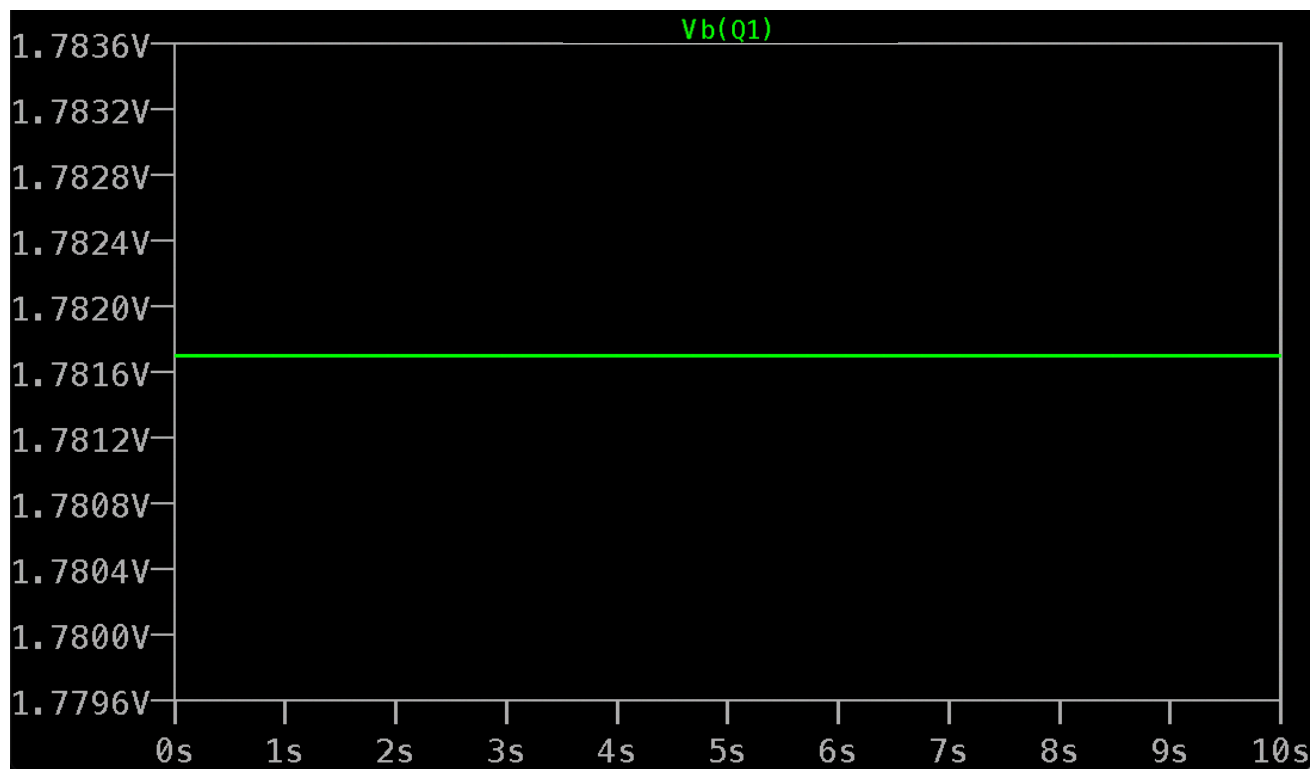


Рис. 4. Напруга на базі за 10 % потенціометра



3.  $U_E$ ,  $U_K$ .

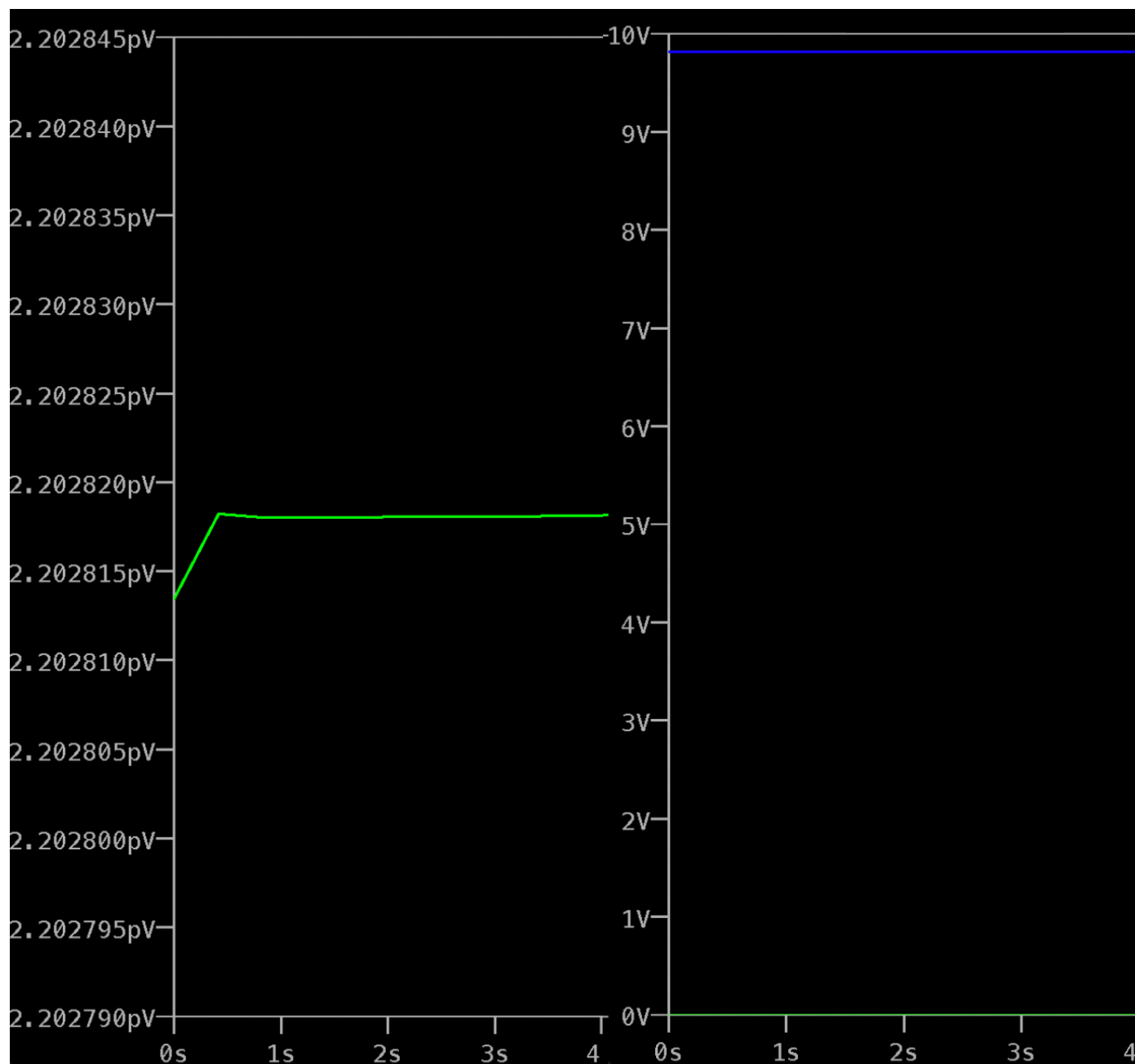


Рис. 5.  $U_E$  та  $U_K$  при 99 %

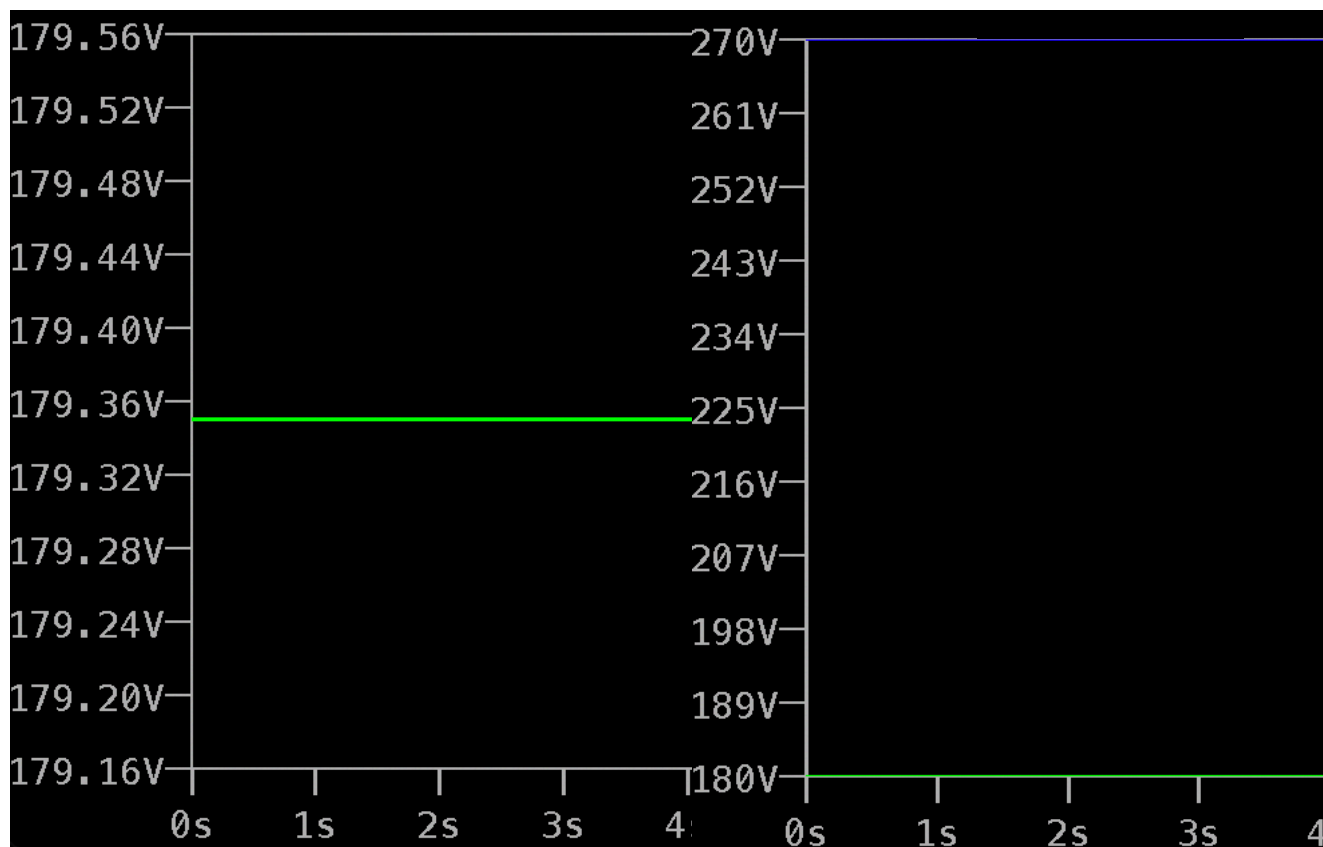


Рис. 6.  $U_E$  та  $U_K$  при 50 %

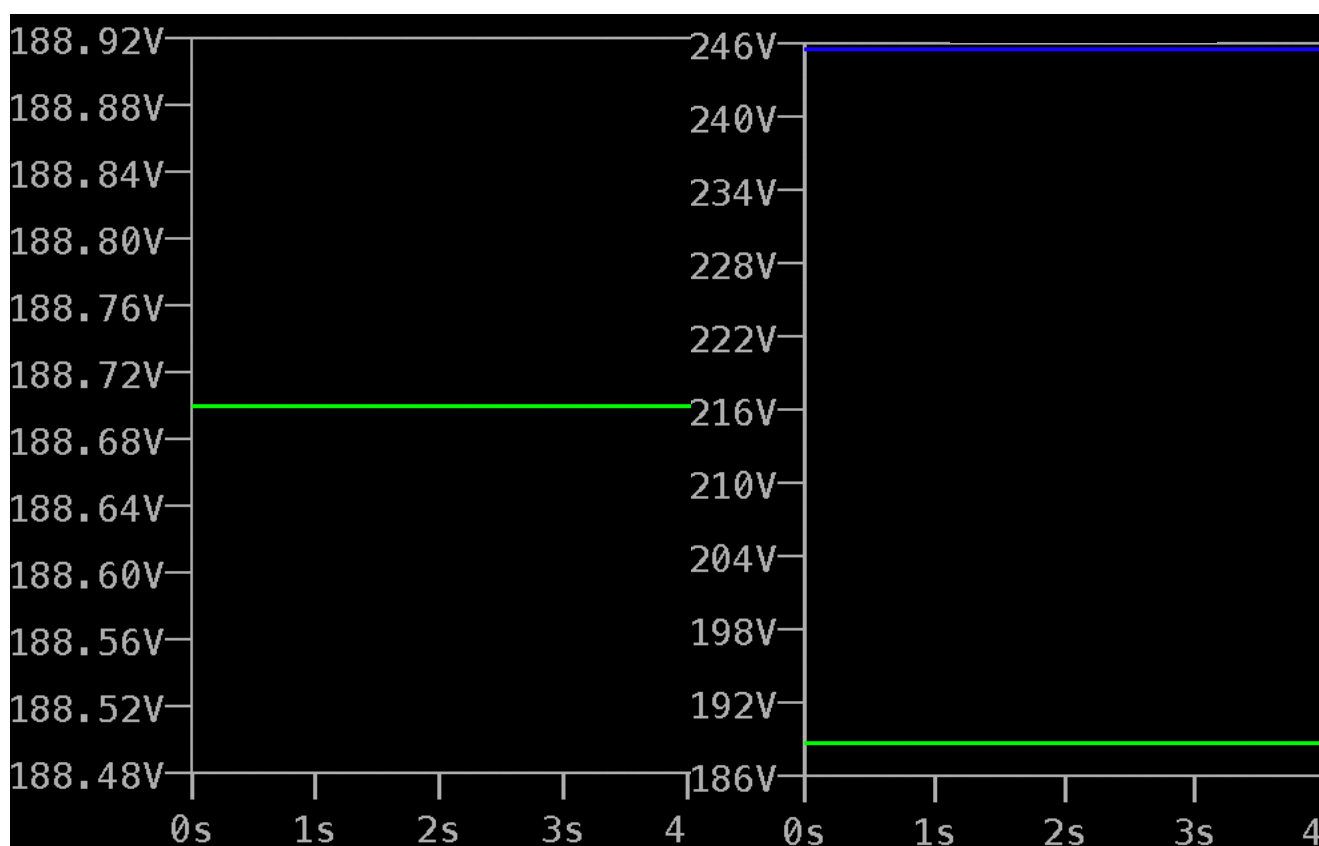


Рис. 7.  $U_E$  та  $U_K$  при 10 %

### 3. ВАХ.

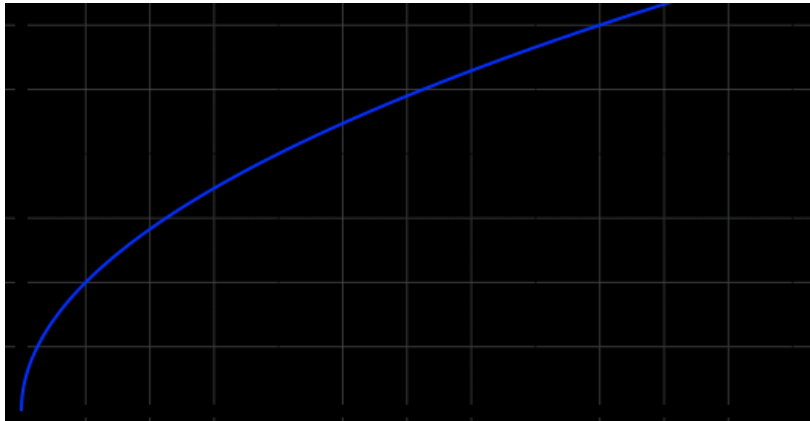


Рис. 8. ВАХ біполярного  
транзистора при 10 %

## II. Уніполярний транзистор.

### 1. Схема.

Зібраний потенціометр використовуватимемо у трьох режимах: 99 % , 50 % , 10 % .

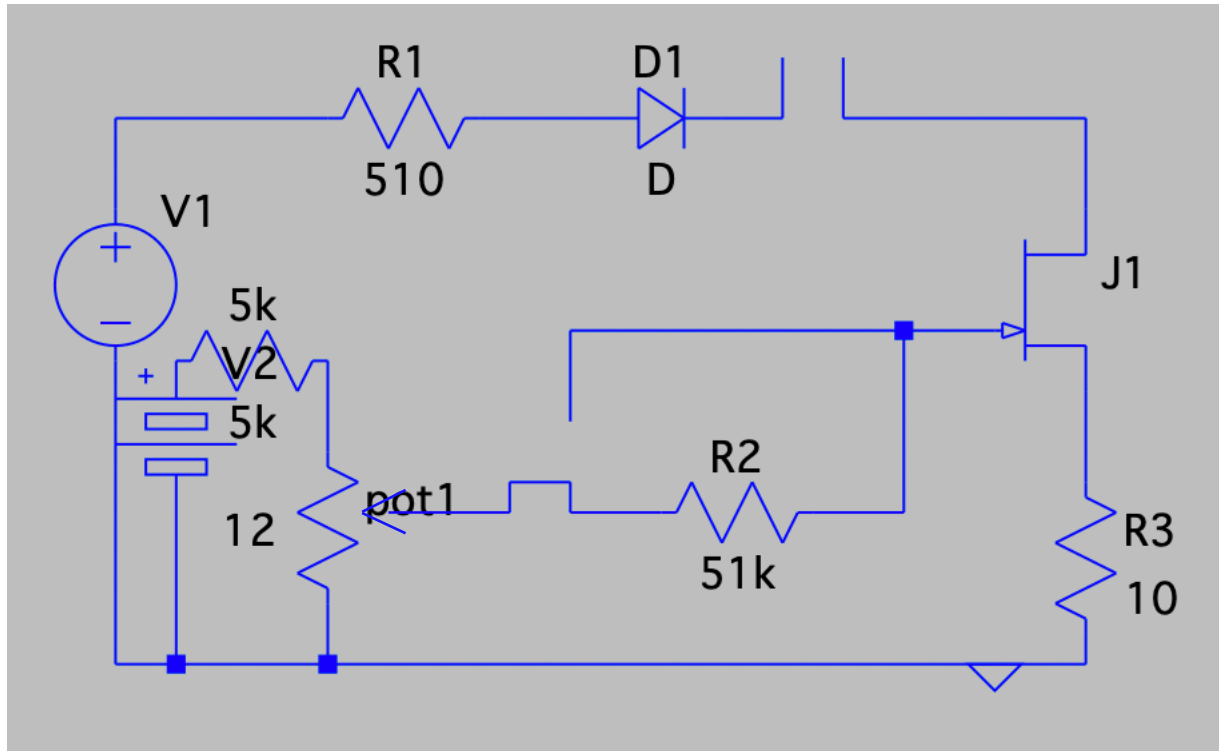


Рис. 9. Схема установки для дослідження ВАХ уніполярного транзистора

## 2. Напруга на базі.

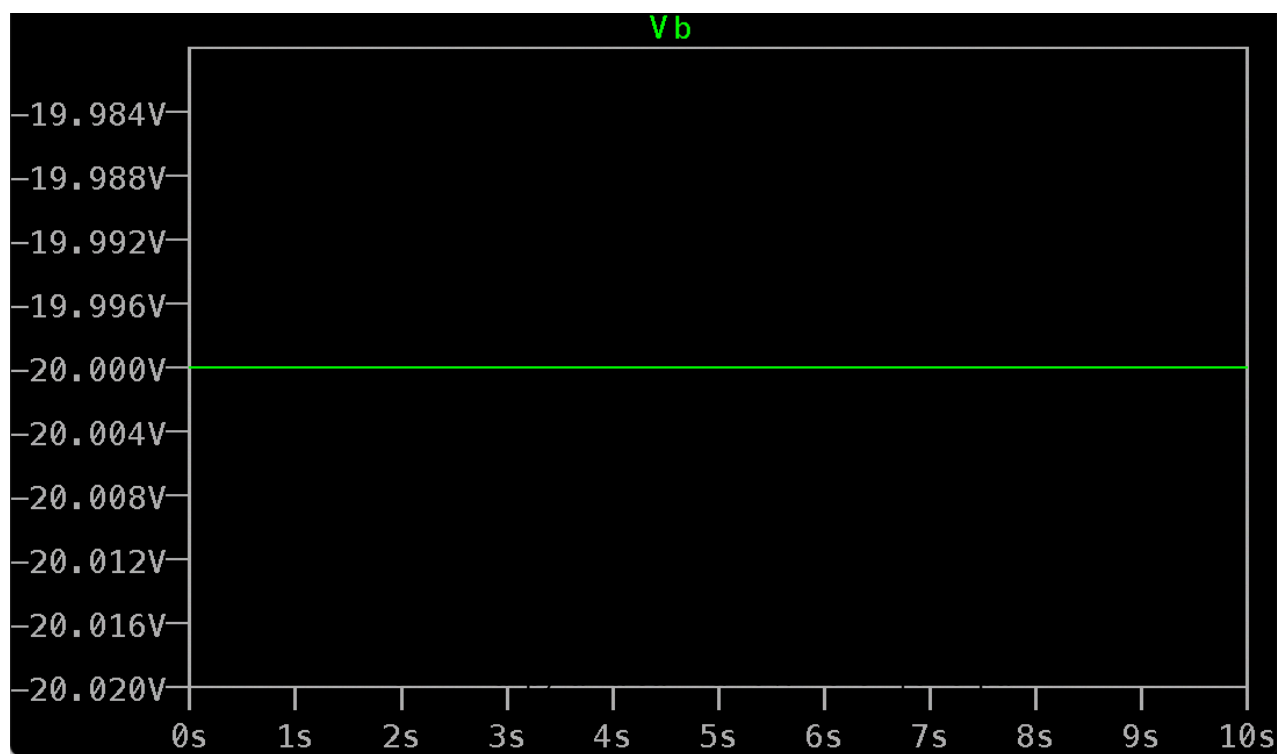


Рис. 10. Напруга на базі за 99 % потенціометра

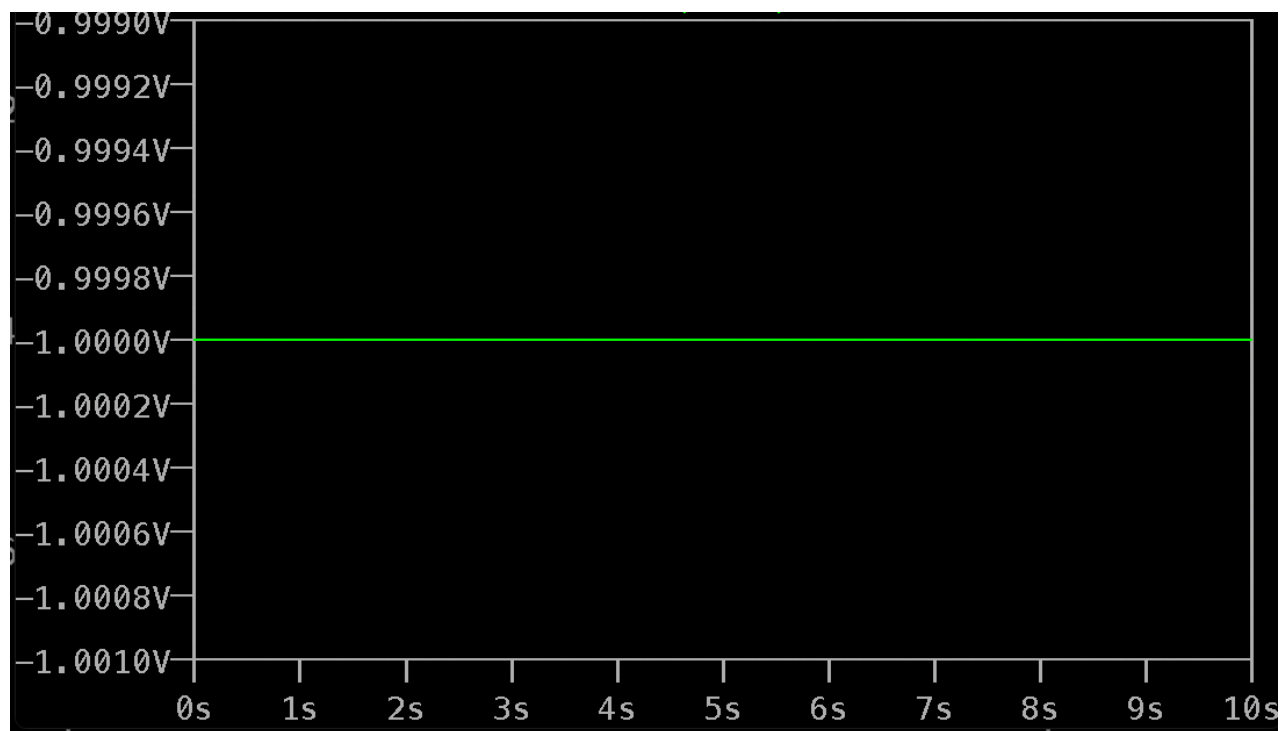


Рис. 11. Напруга на базі за 50 % потенціометра

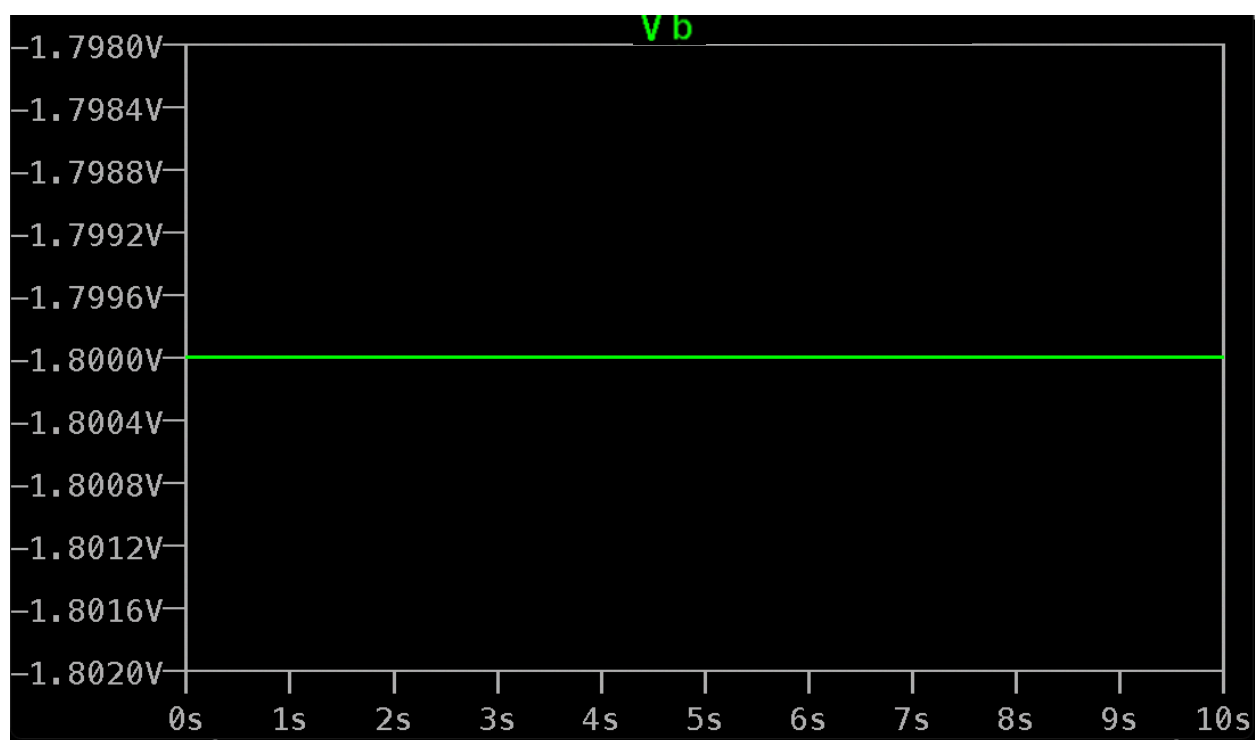


Рис. 12.  $U_E$  та  $U_K$  при 99 %

3.  $U_E$ ,  $U_K$ .

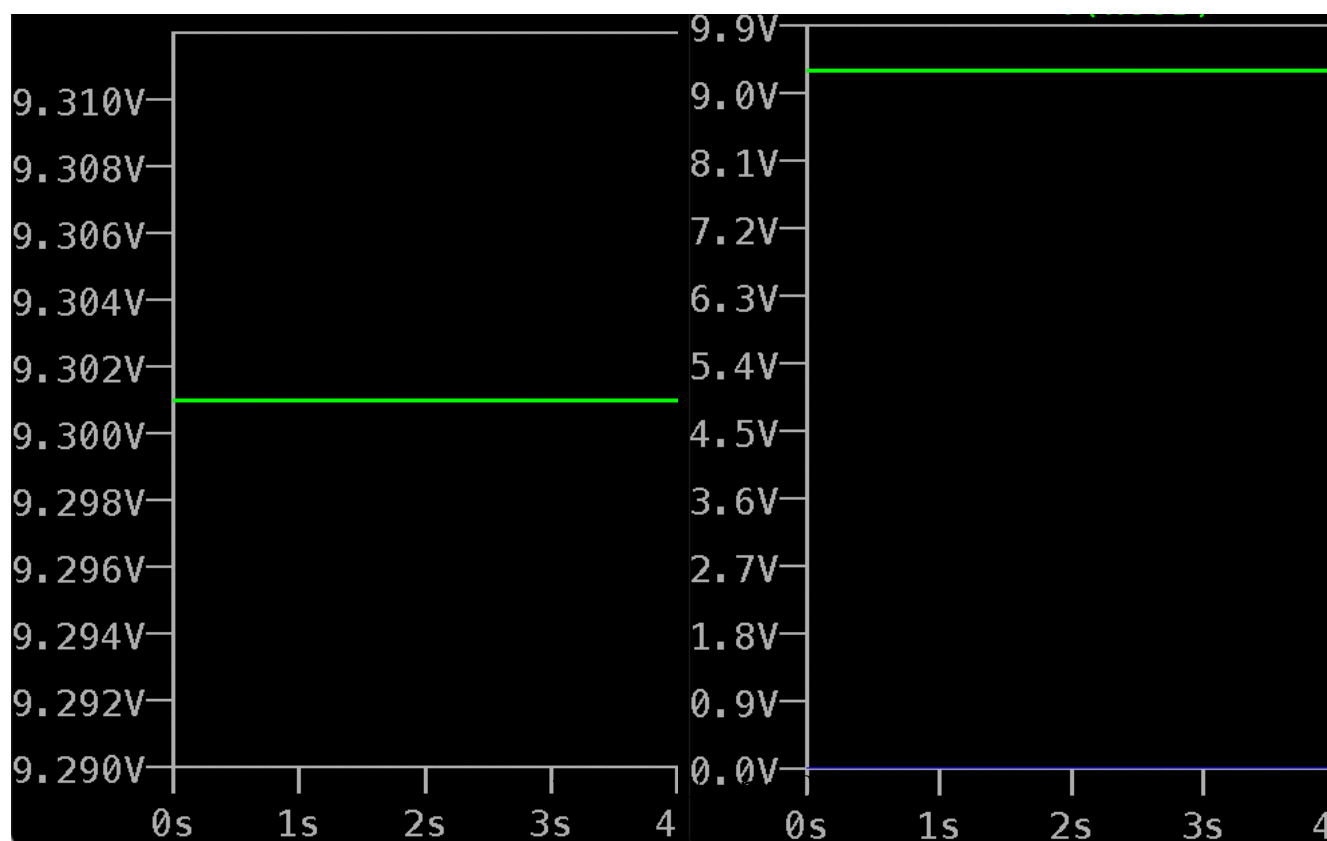


Рис. 13.  $U_E$  та  $U_K$  при 99 %

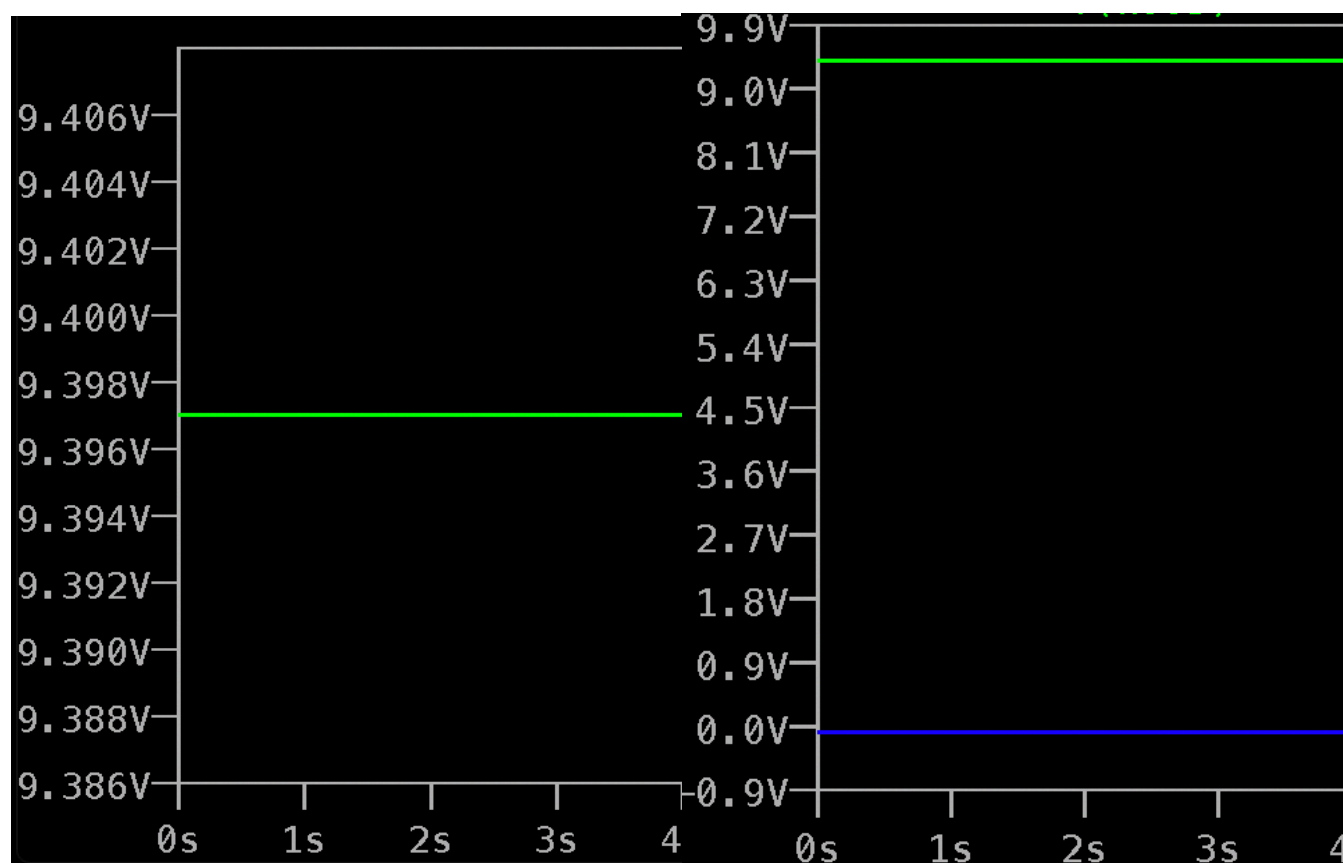


Рис. 14.  $U_E$  та  $U_K$  при 50 %

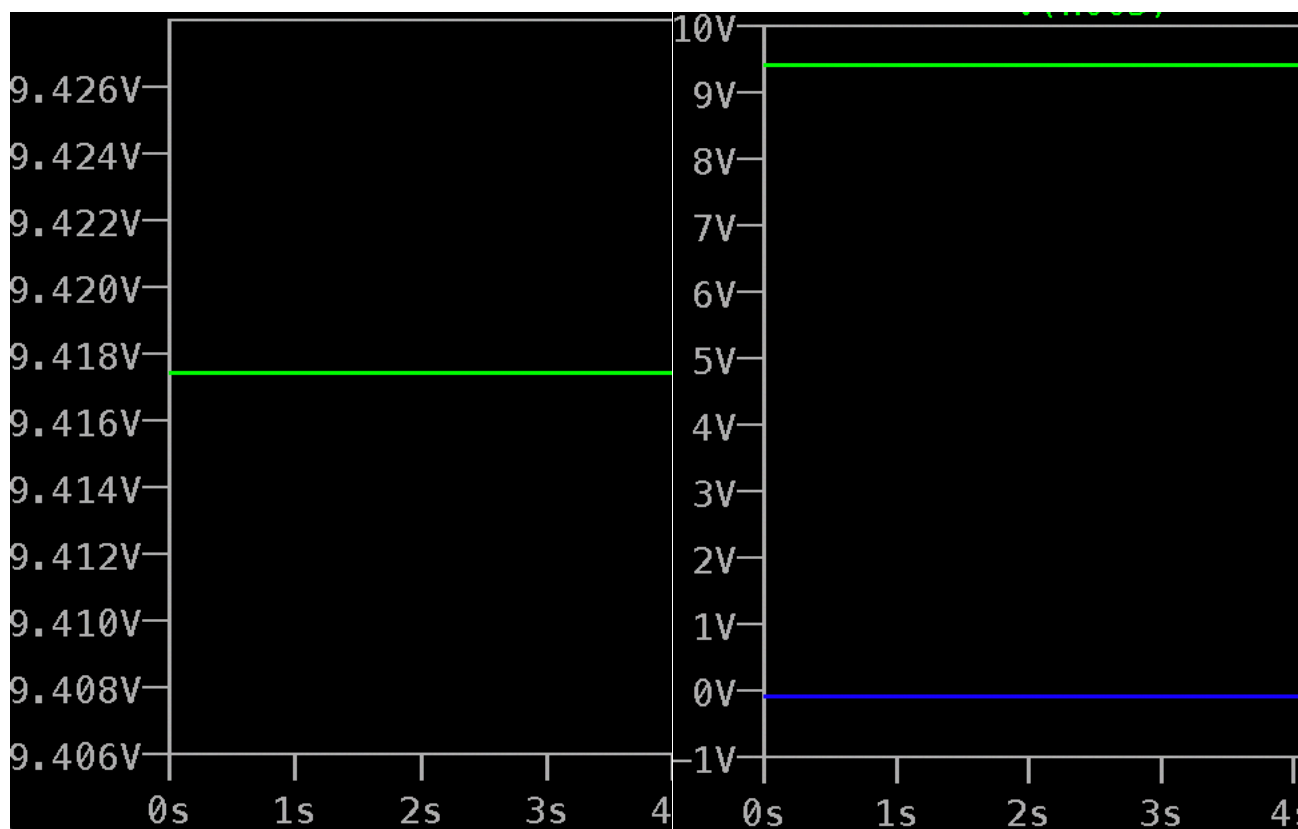


Рис. 15.  $I_K$  при 10 %



4.  $I_K$ .

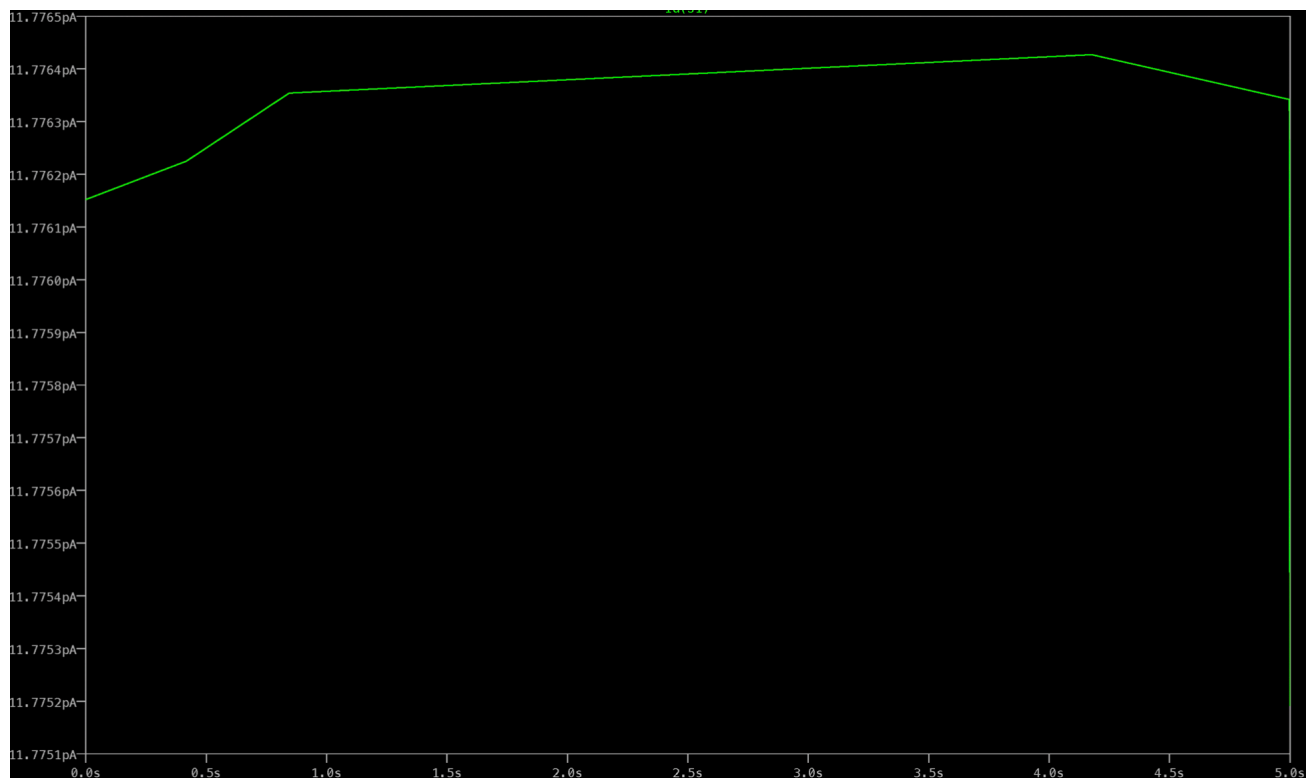


Рис. 16.  $I_K$  при 10 %

## 5. BAX.

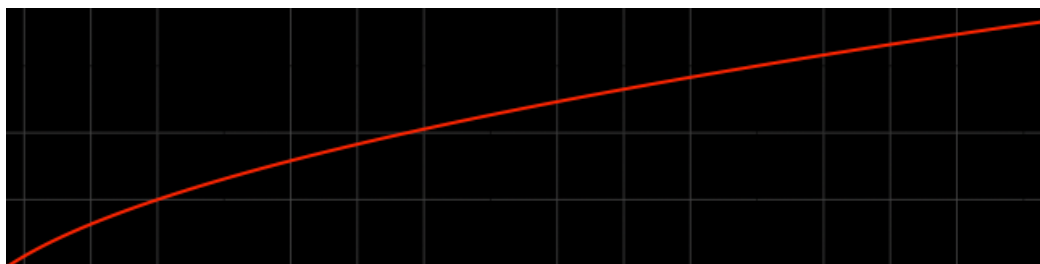


Рис. 17. BAX при 10 %

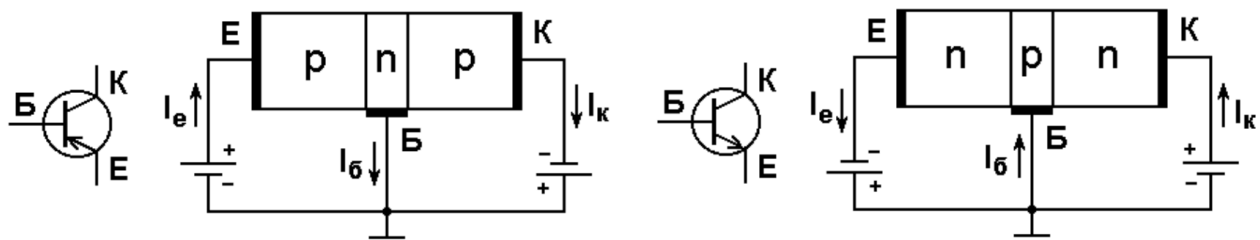
**Висновок:** за допомогою даної лабораторної роботи вдалось отримати графіки залежності напруги від часу транзисторів на базі, колекторі й еміторі. При дослідження використовувалось два типи транзисторів: біполярні й уніполярні. Було вивчено також залежність струму від часу для польового транзистора, що дає змогу представити ВАХ цього транзистора.

Усі покази отримано за допомогою комп'ютерного моделювання у програмі LTspice ® та за допомогою її вбудованих можливостей Waveform Data.

### Частина 3. Контрольні запитання.

1. Будова, типи та умовні позначення біполярних транзисторів.

**Біполярний транзистор** являє собою сукупність двох р-п-переходів, складених з двох р-областей і однієї п-області (структура типу р-п-р) або з двох п-областей і однієї р-області (структура типу п-р-п). Одна з крайніх областей носить назву емітера, а інша – колектора, середню область називають базою. (База-)емітерний р-п-перехід включають у прямому напрямку, а (база-)колекторний р-п-перехід – у зворотному.



На рисунку також показані умовні позначення біполярних транзисторів на електричних схемах. Стрілка в позначеннях емітера вказує напрямок прямого струму через база-емітерний перехід.

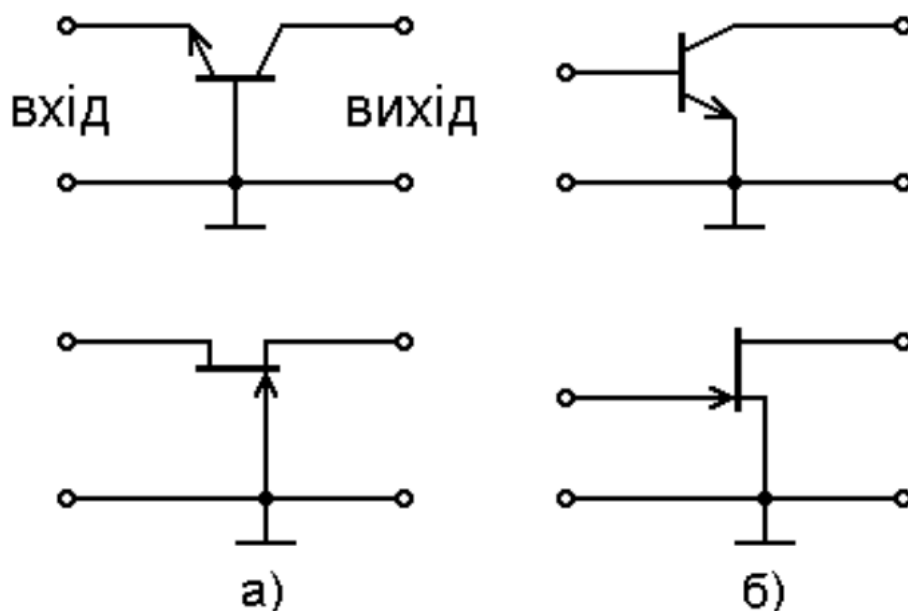
## 2. Принцип роботи біполярного транзистора. Зв'язок між величинами струмів емітера, бази та колектора.

Роботу біполярного транзистора зручно розглядати при включенні його за так званою схемою зі спільною базою, коли вивід бази є спільним для вхідного струму (напруги) та вихідного струму (напруги). Вихідним струмом транзистора в такій схемі є струм колектора. Цей струм є нічим іншим як струмом неосновних носіїв, що протікає через  $p$ -перехід, увімкнений у зворотному напрямку (для  $p$  це струм дірок, для  $n$  — електронів). При нульовій різниці потенціалів між емітером і базою (закороченому вході транзистора) вихідна ВАХ збігається з ВАХ напівпровідникового діода, до якого прикладено напругу у зворотному напрямку. Характерною є слабка залежність струму колектора від різниці потенціалів. Струм залежить виключно від концентрації неосновних носіїв у базі поблизу колекторного переходу. Зміна концентрації неосновних носіїв у базі і, зокрема, біля колекторного переходу досягається їх введенням (емісією) в базу через емітерний перехід. Не всі введені носії заряду досягають колекторного переходу, оскільки в базовій області вони можуть рекомбінувати з основними носіями. При цьому в базу підтягуються електрони зі спільного вивода бази, тобто з бази витікає струм бази (нагадаємо, що напрямок струму протилежний напрямку руху електронів). Таким чином, струм через емітер:

$$I_E = I_K + I_B \approx I_K$$

Принцип дії транзисторів типу  $n$ - $p$ - $n$  не відрізняються від розглянутого вище, лише в область бази вводяться з емітера не дірки, а електрони. Полярність прикладеної до переходів напруги є також протилежною (другий рисунок).

3. Схема включення біполярних транзисторів зі спільною базою та зі спільним емітером. Яка з цих схем забезпечує підсилення струму? Статичний та диференціальний коефіцієнти підсилення транзистора за струмом.



На рисунку показано включення транзисторів зі спільною базою та емітером. Схема підключення зі спільним емітором забезпечує підсилення струму, базою — напруги.

**Статистичним коефіцієнтом** підсилення транзистора за струмом називають величину

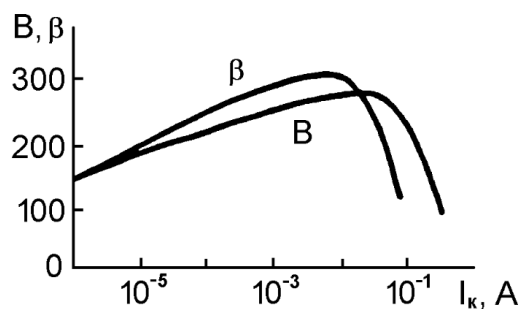
$$B(I_K) = \frac{I_K}{I_B},$$

однак цей коефіцієнт має місце лише на обмеженому проміжку значень  $I_K$ .

**Диференціальним коефіцієнтом** підсилення транзистора за струмом називають величину

$$\beta = \frac{dI_K}{dI_B}.$$

Цей коефіцієнт визначається за сталої напруги між колектором та емітером.

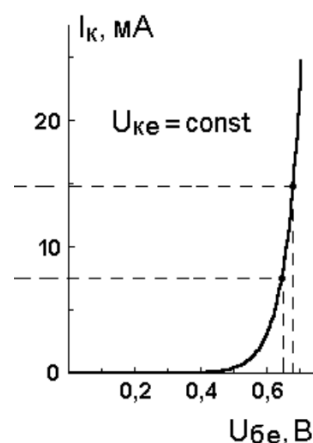
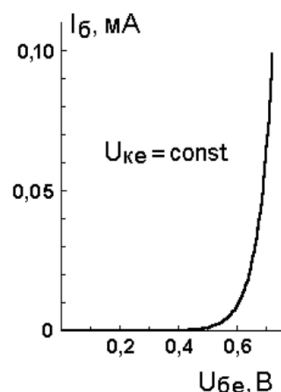


4. Вхідні та вихідні характеристики біполярного транзистора в схемі зі спільним емітером. Пояснити форму вихідних характеристик транзистора для такої схеми

Однією з найпоширеніших схем включення є схема зі спільним емітером.

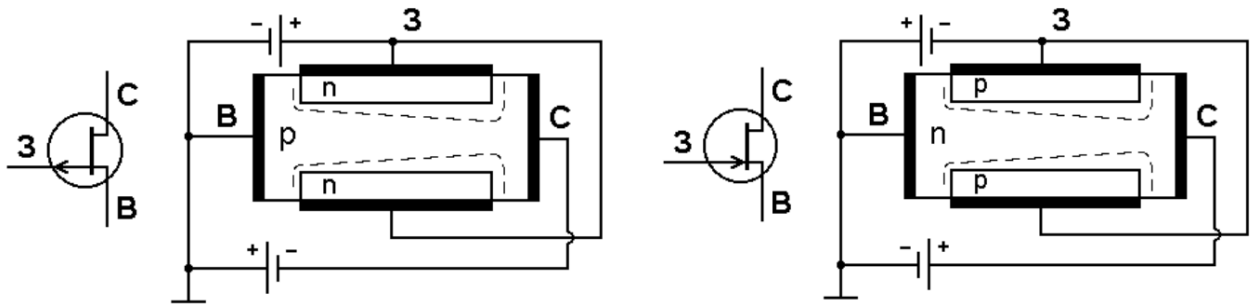
**Вхідною характеристикою** в цьому випадку є функція струму бази від напруги між базою та емітером при постійній напрузі колектор-емітер (1), а **вихідною** — зв'язок між струмом колектора і напругою між колектором та емітером при фіксованій напрузі база-емітер. Вхідна характеристика подібна до ВАХ р-n-переходу, включеного у прямому напрямку. Іноді замість вхідної характеристики користуються так званою передавальною — залежністю струму колектора від база-емітерної напруги при постійній напрузі колектор-емітер (2) — як більш інформативною.

На рисунках показано форми вхідних характеристик (1) і (2). відповідно. Їхня форма аналогічна ВАХ р-n-переходу в прямому напрямку, оскільки ці величини на пряму від неї залежать (чим більший р-n-перехід, тим більший струм через базу і навпаки).



## 5. Будова, типи та умовні позначення польових транзисторів.

Принцип роботи польових транзисторів простіший за принцип дії біполярних транзисторів. Польовий транзистор являє собою триелектродний прилад, в якому струм створюють основні носії заряду під дією повздовжнього електричного поля, а керування величиною цього струму здійснюється поперечним електричним полем, що створюється напругою, прикладеною до керувального електрода.



За конструктивними особливостями всі польові транзистори поділяються на дві групи:

- польові транзистори з p-n-переходом;
- польові транзистори з ізолюваним затвором.

На рисунку також показані умовні позначення польових транзисторів на електричних схемах.

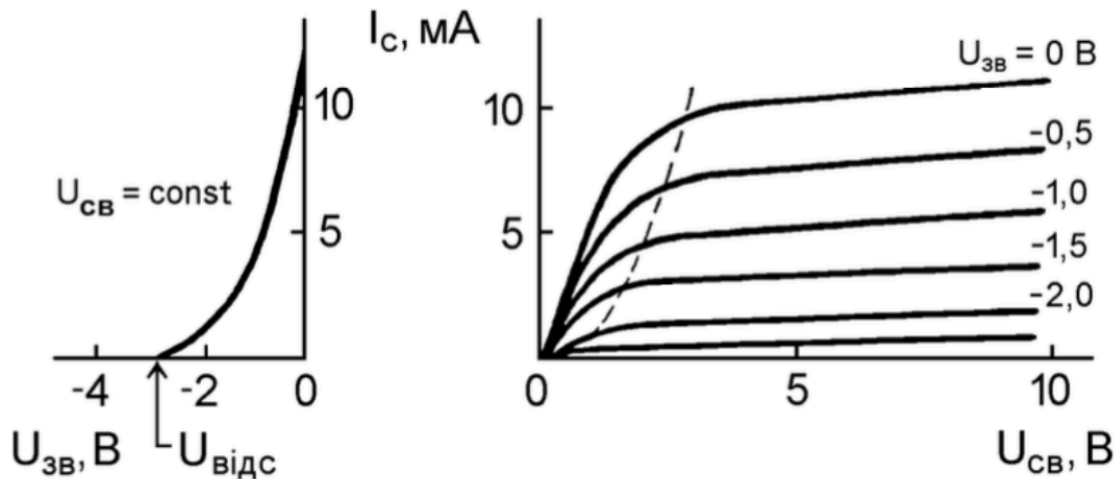


## 6. Схема включення та принцип дії польового транзистора з р-n-переходом.

На першому рисунку наведено схематичне зображення конструкції польових транзисторів з р-n-переходом і схеми їх включення. Тонкий шар напівпровідника n-типу (або р-типу), обмежений з двох боків р-n-переходами, називають **каналом**. Канал включають в електричне коло за допомогою двох електродів, один з яких називають **витоком**, а другий – **стоком**. Електрод, який приєднується в поперечному напрямку до областей р-типу (або n-типу), відповідно, є керувальним і носить назву **затвора**. Величина струму в каналі (за відсутності керувальної дії затвора) залежить від напруги, прикладеної між стоком і витоком, та від опору напівпровідникової пластинки між цими виводами. Якщо для транзистора з р-каналом до затвора прикласти позитивну відносно витока напругу, то це призведе до збільшення товщини р-n-переходу і, відповідно, до зменшення площі перерізу каналу. Зі зменшенням перерізу каналу збільшується опір між стоком та витоком, що призводить до зменшення величини струму крізь канал.

Таким чином, керування струмом каналу здійснюється напругою на затворі, яка відповідає зворотній напрузі на керувальному р-n-переході. Оскільки керувальний струм дуже малий, то потужність керування буде мізерною. В той же час струм каналу може бути досить великим, а керувальний вплив може знижувати його до нуля. Напруга на затворі, при якій струм крізь канал припиняється, називають **напругою відсічки**.

7. Вихідні (стокові) та стокозатворна характеристики польового транзистора з р-п переходом. Напруга насичення, напруга відсічки. Крутизна характеристики.



На рисунку зображено сімейство характеристик типового польового транзистора з керувальним р-п-переходом. Вигляд цих характеристик подібний до характеристик біполярних транзисторів. При цьому стік відповідає колектору, витік – емітеру, а затвор – базі біполярного транзистора. Відмінність полягає в діапазоні напруг між затвором і витком  $U_3$ . Напруга, при якій струм стоку  $I_C$  сягає мінімального значення, називають **напругою відсічки**. При напругах затвор-витік, більших за  $U_B$ , передавальна характеристика польового транзистора, представлена на першому рисунку, описується рівнянням:

$$I_C = I_{C_0} \left( 1 - \frac{U_3}{U_B} \right)^2,$$

тут  $I_{C_0}$  — струм стоку при  $U_3 = 0$ . На практиці ця величина струму стоку для польового транзистора з керувальним р-п-переходом є граничною, тому що позитивних напруг затвор-витік намагаються уникати, щоб не втрачати переваг, зумовлених малим струмом затвора. За передавальною характеристикою польового транзистора можна визначити такий його параметр, як крутизна

$$S = \frac{dI_C}{dU_3}$$

Максимального значення крутизна досягає при  $I_C = I_{C_0}$ .

8. Принцип роботи з ізолюваним затвором. Стокові та стокозатворні характеристики такого транзистора.

Польові транзистори з ізолюваним затвором знаходять широке застосування в сучасній електроніці. Зокрема, на їх основі побудовані напівпровідникові запам'ятовувальні пристрої (флеш-пам'ять, англ. flash memory) та приймачі оптичного випромінювання (світлочутливі прилади з зарядовим зв'язком, англ. photosensitive charge-coupled devices (CCD)).

### Використані джерела:

Методичні вказівки до практикуму «Основи радіоелектроніки» для студентів фізичного факультету / Упоряд. О.В.Слободянюк, Ю.О.Мягченко, В.М.Кравченко.- К.: Поліграфічний центр «Принт лайн», 2007.- 120 с.

Ю.О. Мягченко, Ю.М. Дулич, А.В.Хачатрян "Вивчення радіоелектронних схем методом комп'ютерного моделювання" : Методичне видання. – К.: 2006.- с.