

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ТАРАСА ШЕВЧЕНКА
Дослідження ВАХ транзисторів

Качур Артем

23 квітня 2021 р.

Зміст

1	Реферат	3
2	Вступ	4
3	Моделювання	5
3.1	Теоретична частина	5
3.2	Моделювання в LTspice	14
4	Висновок	17

1 Реферат

Звіт про виконання лабораторної роботи: 17 с., 4 ч., 13 рис.

Об'єкт дослідження – процеси проходження струму крізь транзистори.

Мета роботи – дослідити вихідні характеристики транзисторів різних типів.

Методи дослідження:

1. одержання зображення ВАХ транзисторів на екрані двоканального осцилографа, що працює в режимі характериографа;
2. побудова сімейства ВАХ шляхом вимірювання певної кількості значень сили струму I_k , що відповідають певним значенням напруги U_{ke} (для певної сили струму бази I_b або напруги U_{be}) для біполярного транзистора та певної кількості значень сили струму стоку I_c , що відповідають певним значенням напруги U_{cb} (для певних значень напруги між затвором і витоком U_{zv}) для польового транзистора, подання результатів вимірів у вигляді графіків.

2 Вступ

Ця лабораторна робота присвячена вивченню вольт-амперних характеристик транзисторів — керованих нелінійних елементів, на основі яких можна створювати підсилювачі електричних сигналів.

Біполярний транзистор — це напівпровідниковий прилад з двома р-п- 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 р-п-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_{zv} .

3 Моделювання

3.1 Теоретична частина

Основна функція, яку виконує транзистор (від англ. transfer – переносити і resistor – опір), подібна до функції звичайного водогінного крана: невеликим зусиллям руки керувати сильним напором води у трубі. У схемі з транзистором за допомогою вхідного сигналу малої потужності можна керувати вихідним сигналом великої потужності.

Існує два найпоширеніших різновиди транзисторів – біполярні та уніполярні (або польові) транзистори.

Біполярний транзистор (англ. bipolar transistor) 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 (від англ. emit – випускати, випромінювати), а інша – колектора (від англ. collect – збирати), середню область називають базою. База-емітерний (або просто емітерний) р-п-перехід включають у прямому напрямку, а база-колекторний (або просто колекторний) р-п-перехід – у зворотному (Рис. 1).

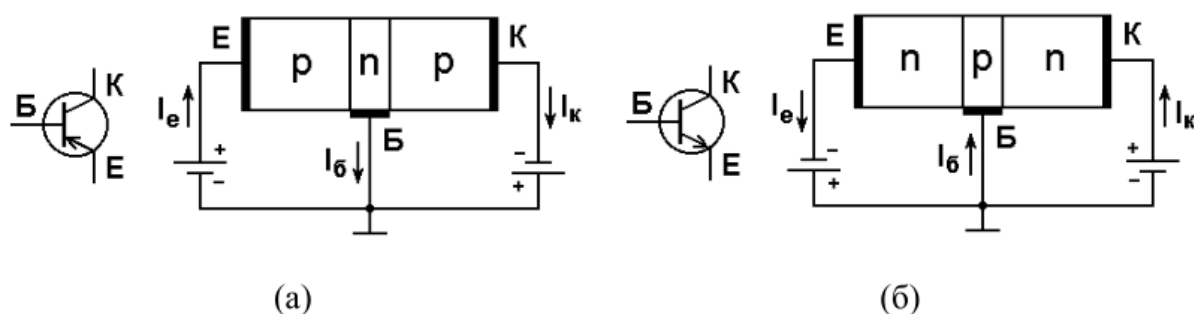


Рис. 1. Умовні позначення і схеми підключення джерел живлення для біполярних транзисторів типу р-п-р (а) і типу п-р-п (б).

Роботу біполярного транзистора (наприклад, типу р-п-р) зручно розглядати при включенні його за так званою схемою зі спільною базою (Рис. 1), коли вивід бази є спільним для вхідного струму (вхідної напруги) та вихідного струму (вихідної напруги). Вихідним струмом транзистора в такій схемі є струм колектора I_k . Цей струм є нічим іншим як струмом неосновних носіїв, що протікає через р-п-перехід, увімкнений у зворотному напрямку (для транзистора типу р-п-р це струм дірок). 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} . Оскільки струм I залежить виключно від концентрації неосновних носіїв у базі поблизу колекторного переходу, то змінюючи цю концентрацію можна змінювати струм колектора I_{kb} . Зміна концентрації неосновних носіїв у базі і, зокрема, біля колекторного переходу досягається їх введенням (емісією) в базу через емітерний перехід. Не всі введені в базу з боку емітерного переходу неосновні носії заряду (в нашому випадку дірки) досягають колекторного переходу, оскільки в базовій області вони можуть рекомбінувати з основними носіями (в нашому випадку електронами). При цьому в базу підтягуються електрони зі спільного вивода бази, тобто з бази витікає струм бази I_b (нагадаємо, що напрямок струму протилежний

напрямку руху електронів).

Таким чином, струм через емітер транзистора I_e дорівнює (Рис. 2)

$$I_e = I_k + I_b \quad (1)$$

В хороших транзисторах $I_b \ll I_k$ і тому в багатьох випадках можна вважати, що

$$I_e \approx I_k \quad (2)$$

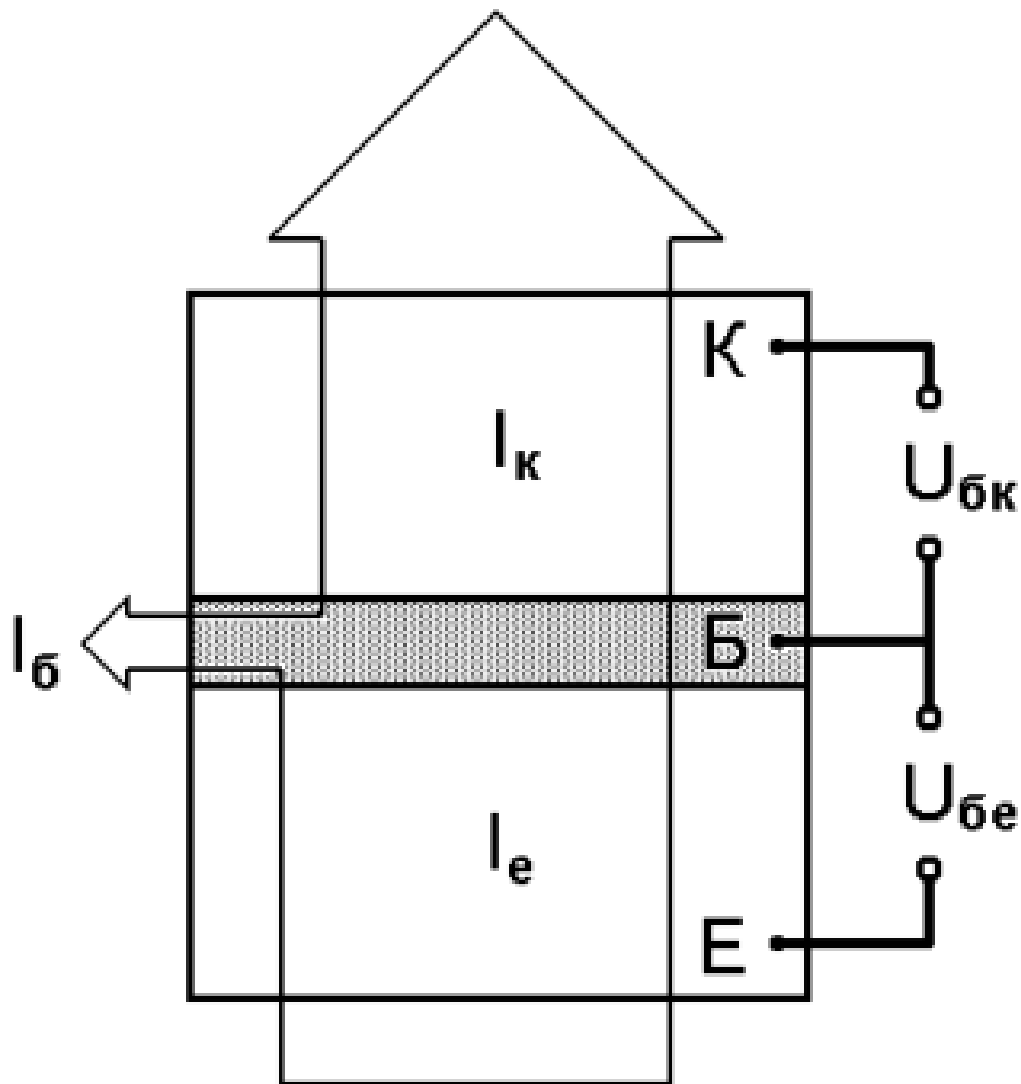


Рис. 2. Розподіл струмів у біполярному транзисторі типу р-п-р.

Таким чином, величина струму бази I_b є показником темпу рекомбінації в базовій області. Для зменшення цієї рекомбінації вживають спеціальних заходів, наприклад, зменшують товщину бази. Збільшення концентрації неосновних носіїв поблизу колекторного переходу призводить до зростання струму колектора I_k , не змінюючи

суттєво характеру його залежності від колекторної напруги U_{bk} : колекторний струм стає більшим, але в області насичення, як і раніше, слабо залежить від U_{bk} .

Оскільки спад напруги U_{be} на переході емітер-база, включеному в пряму напругу, є незначним (0,2–0,7 В для різних типів транзисторів), а зворотна напруга U_{bk} на переході база-колектор може становити десятки вольт і струм I_k I_e , то маємо підсилення електричної потужності (нагадаємо, що потужність — це добуток сили струму на напругу) в десятки разів.

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 (Рис. 1). На Рис. 1 також показані умовні позначення біполярних транзисторів на електричних схемах. Стрілка в позначеннях емітера вказує напрямок прямого струму через база-емітерний перехід.

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 (англ. field-effect transistor, FET) поділяються на дві групи: 1) польові транзистори з p-n- переходом та 2) польові транзистори з ізольованим затвором.

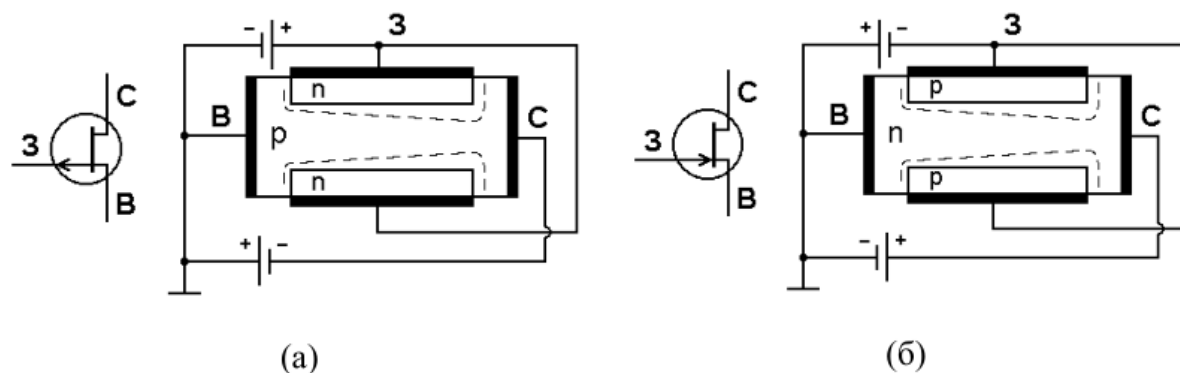


Рис. 3. Умовні позначення і схеми підключення джерел живлення для польових транзисторів з р-п-переходом і каналом р-типу (а) та каналом n-типу (б). Пунктиром показано границі включених у зворотному напрямку р-п-переходів.

На Рис. 3 наведено схематичне зображення конструкції польових транзисторів з р-п-переходом і схеми їх включення. Тонкий шар напівпровідника n-типу (або р-типу), обмежений з двох боків р-п-переходами, називають каналом (англ. channel). Канал включають в електричне коло за допомогою двох електродів, один з яких називають витоком (рос. исток, англ. source), а другий – стоком (англ. drain). Електрод, який приєднується в поперечному напрямку до областей р-типу (або n-типу), відповідно, є керувальним і носить назву затвора (англ. gate). 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-п-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-п-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.

Польові транзистори з ізольованим затвором мають структуру метал- діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори, англ. MIS transistors) (Рис. 4). Як діелектрик може використовуватись плівка двоокису кремнію SiO_2 і тому такі транзистори ще називають транзисторами зі структурою метал-оксид- напівпровідник (МОН-транзистори, англ. MOS transistors). Основою приладу є пластинка (підкладка) з монокристалічного кремнію р-типу. Області стоку та витоку являють собою ділянки кремнію, сильнолеговані домішками п-типу (такі області позначають символом n^+). Відстань між стоком та витоком – близько 1 мкм.

Наявність діелектрика знімає обмеження на полярність прикладеної до затвора напруги: вона може бути як позитивною, так і негативною, причому в обох випадках струм затвора відсутній.

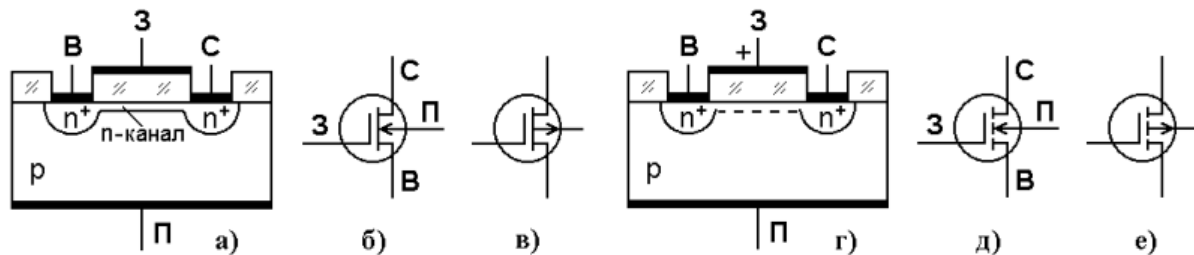


Рис. 4. Будова та умовні позначення польових транзисторів з ізольованим затвором і вбудованим каналом п-типу (а, б) і р-типу (в) та польових транзисторів з ізольованим затвором й індукованим каналом п-типу (г, д) і р-типу (е).

На Рис. 4 показані два основні різновиди МДН-транзисторів. У першому з них між сильнолегованими областями витоку і стоку є спеціально створений канал того ж типу провідності, що й області витоку й стоку (вбудований канал) (Рис. 4). Провідність такого каналу регулюється напругою на затворі відносно витоку. У випадку вбудованого каналу п-типу негативна напруга на затворі «виштовхує» електрони з каналу і його провідність зменшується (режим збіднення), а позитивна напруга – «притягує» електрони і провідність каналу зростає (режим збагачення). У другому різновиді МДН-транзисторів канал спеціально не створюється (Рис. 4). Тому при нульовій напрузі на затворі провідність між витоком і стоком практично відсутня. Однак при достатньо великій позитивній напрузі на затворі відносно витоку і підкладки у приповерхневий шар напівпровідника між витоком і стоком під дією електричного поля втягуються електрони з підкладки р-типу (де вони є неосновними носіями) та з сильнолегованих n^+ -областей витоку й стоку (де вони є основними носіями). Таким чином, між витоком і стоком утворюється індукований канал (зображений пунктиром на Рис. 4), по якому може протікати струм. Зрозуміло, що МДН-транзистори з індукованим каналом можуть працювати лише в режимі збагачення.

Схеми включення і характеристики транзисторів

Транзистор в схемах включення можна розглядати як активний чотириполюсник (Рис. 5). Оскільки транзистор має тільки три виводи (емітер, базу, колектор або витік, затвор, стік), то в схемі чотириполюсника один з виводів є спільним для входу і виходу. В залежності від того, який з виводів транзистора вибрано спільним, розрізняють три схеми включення: зі спільною базою (затвором), спільним емітером (витоком) та спільним колектором (стоком).

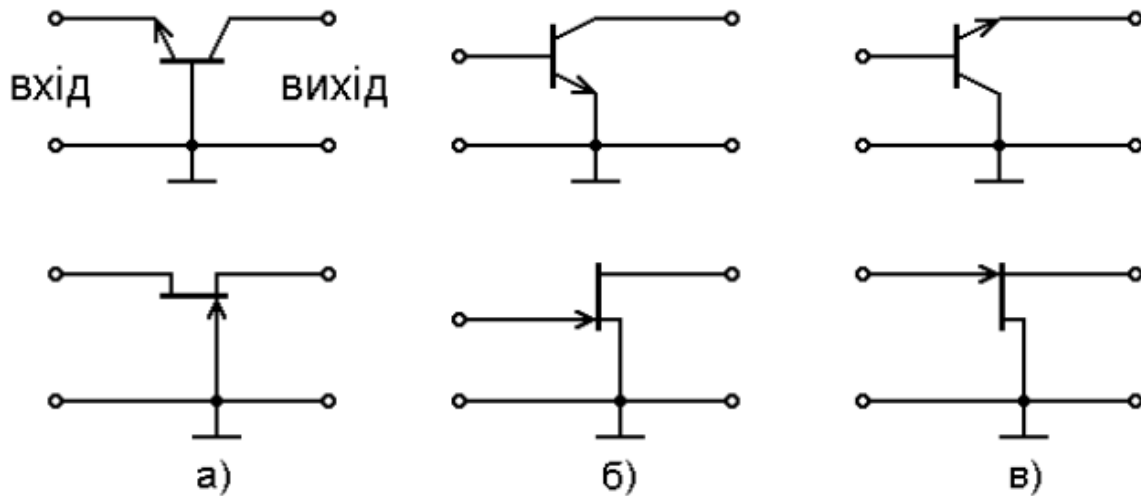


Рис. 5. Схеми включення транзисторів: а) зі спільною базою (затвором), б) зі спільним емітером (витоком), в) зі спільним колектором (стоком).

Для дослідження властивостей транзистора звичайно використовують так звані вхідні та вихідні характеристики. Вхідна характеристика – це залежність вхідного струму від вхідної напруги (при постійній вихідній напрузі), а вихідна – залежність вихідного струму від вихідної напруги (при постійній вхідній). В кожній зі схем включення вхідними і вихідними будуть різні ланки транзистора, тому й характеристики в різних схемах включення будуть відрізнятися.

Однією з найпоширеніших схем включення є схема зі спільним емітером (Рис. 6). Вхідною характеристикою в цьому випадку є функція струму бази від напруги між базою та емітером при постійній напрузі колектор-емітер (Рис. 6), а вихідною – зв'язок між струмом колектора і напругою між колектором та емітером при фіксованій напрузі база-емітер (Рис. 6). Вхідна характеристика подібна до ВАХ р-п-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 – як більш інформативною (Рис. 6).

Однією з особливостей біполярного транзистора є те, що колекторний струм на вихідній характеристиці мало змінюється після досягнення певного значення, яке називають струмом насичення $I_{нас}$. Напруга, при якій характеристика має вигин і колекторний струм досягає насичення, називається напругою насичення $U_{нас}$ (див. Рис. 6).

Іншою особливістю є те, що малої зміни вхідної напруги виявляється достатньо, щоб викликати відносно великі зміни колекторного струму. Це досить добре видно з

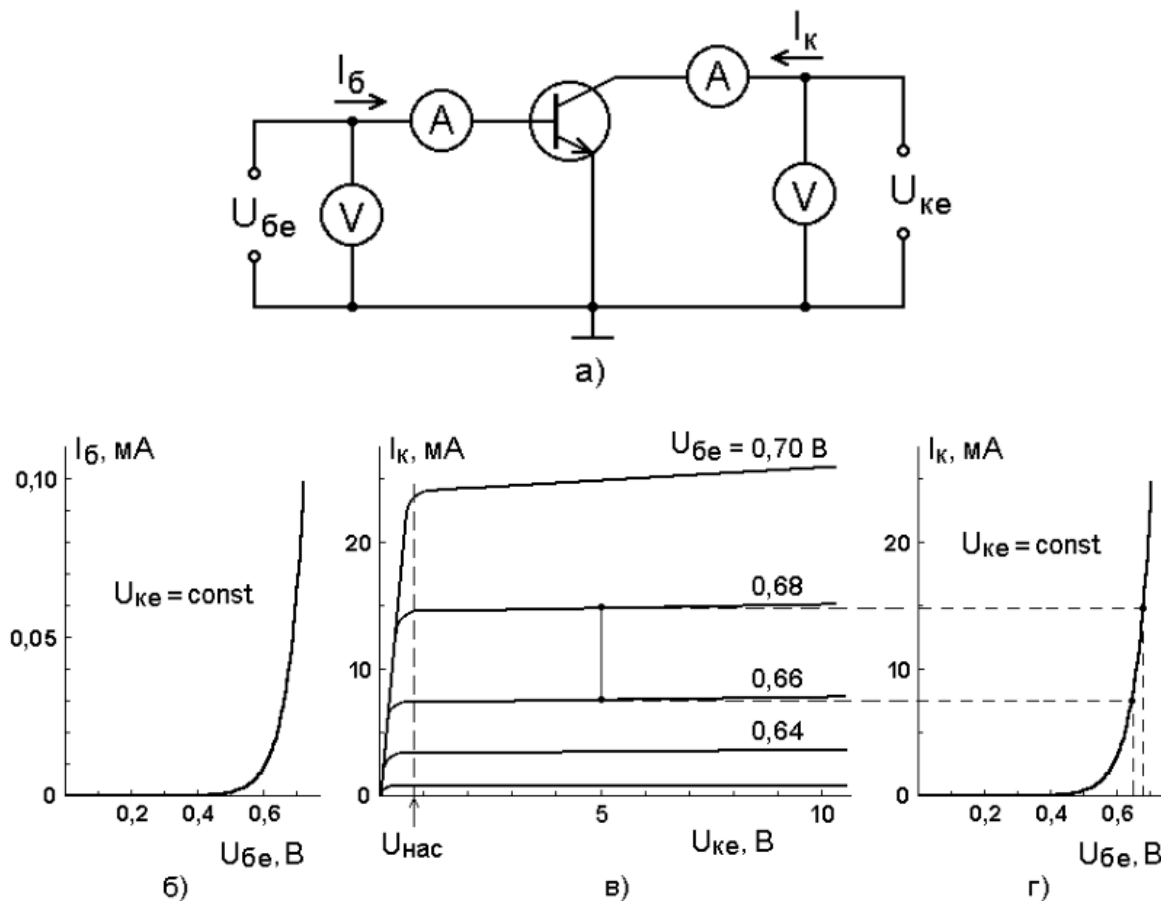


Рис. 6. Схема вимірювання (а) вольт-амперних характеристик кремнієвого біполярного транзистора, включеного за схемою зі спільним емітером: входної (б), вихідної (в), передавальної (г).

передавальної характеристики, яка подібна до входної характеристики.

Якщо через транзистор тече великий вихідний струм (в схемі зі спільним емітером це струм I_k), то кажуть, що транзистор відкритий, якщо ж вихідний струм малий, то кажуть, що транзистор закритий (цим двом випадкам відповідають, наприклад, верхня і нижня криві на Рис. 6 при $U_{ke} > U_n$). У кожному з цих двох станів транзистор може перебувати нескінченно довго (якщо не відключати напругу живлення). Перевести транзистор із закритого стану у відкритий і навпаки можна лише за рахунок зовнішнього впливу, наприклад шляхом подачі на вхід транзистора імпульсу напруги позитивної чи негативної полярності. Отже, транзистор може перебувати у двох різних стійких станах (тобто він являє собою бістабільний елемент), що забезпечує йому широке застосування як швидкодіючого елемента безконтактних переключальних пристроїв.

Звичайно транзистор використовують в схемах підсилення відносно невеликих змінних напруг. Тому для розрахунку таких схем вводять деякі параметри транзисторів, зручні для опису його властивостей на тій чи іншій ділянці ВАХ. Назвемо деякі найбільш вживані. Залежність колекторного струму від напруги колектор-емітер на ділянці насичення вихідної характеристики описується диференціальним вихідним опором

$$R_{\text{вих}} = \frac{dU_{\text{ке}}}{dI_{\text{к}}}, \text{ при } U_{\text{бе}} = \text{const} \quad (3)$$

Диференціальний вхідний опір можна визначити за вхідною характеристикою як

$$R_{\text{вх}} = \frac{dU_{\text{бе}}}{dI_{\text{б}}}, \text{ при } U_{\text{ке}} = \text{const} \quad (4)$$

Оскільки ця характеристика описується такою ж експоненційною функцією, що й передавальна, то колекторний струм буде пропорційний базовому. Коефіцієнт пропорційності

$$B = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} \quad (5)$$

називають статичним коефіцієнтом підсилення за струмом. Однак пропорційність має місце тільки в обмеженій області струму, тому що B залежить від $I_{\text{к}}$. Ця залежність показана на Рис. 7. Диференціальний коефіцієнт підсилення за струмом при фіксованій напрузі між колектором і емітером визначається виразом:

$$\beta = \frac{dI_{\text{к}}}{dI_{\text{б}}}, \text{ при } U_{\text{ке}} = \text{const} \quad (6)$$

Залежність цієї величини від $I_{\text{к}}$ також показана на Рис. 7.

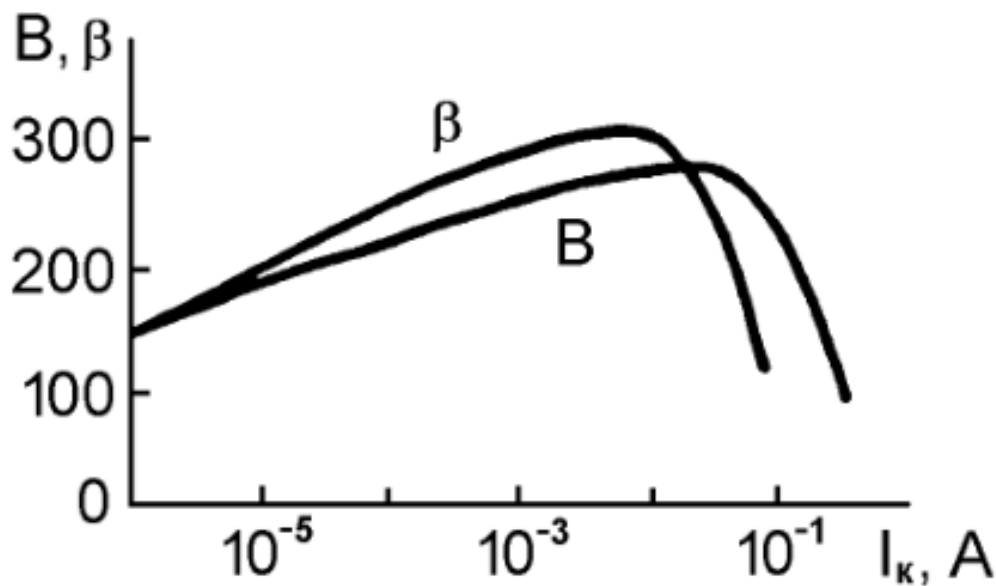


Рис. 7. Залежність статичного (B) і диференціальних коефіцієнтів підсилення за струмом біполярного транзистора від величини сили струму колектора.

На Рис. 8 зображено сімейство характеристик типового польового транзистора з керувальним р-п-переходом. Вигляд цих характеристик подібний до характеристик

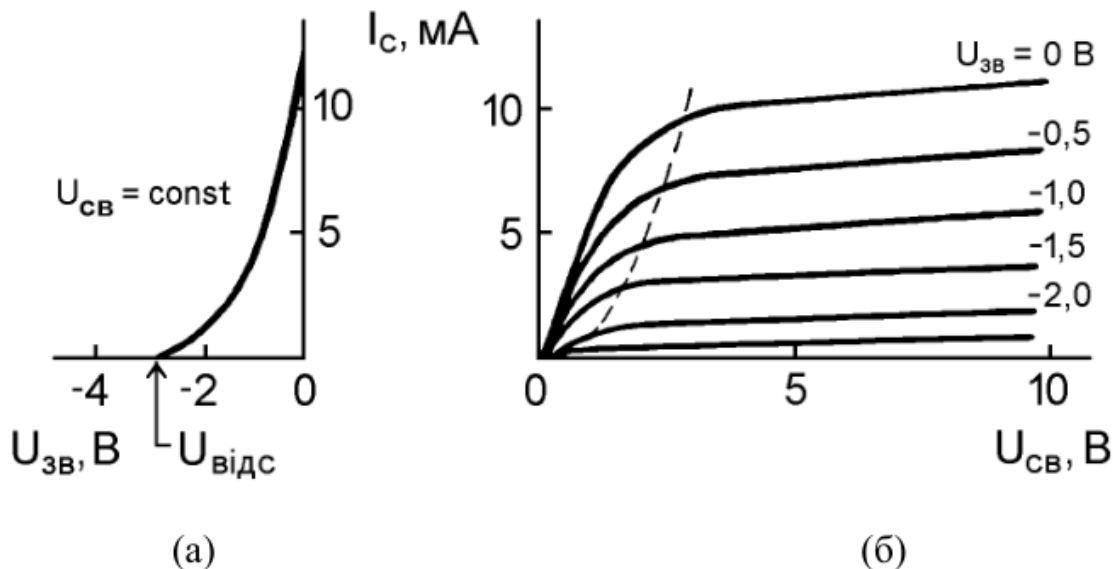


Рис. 8. Вольт-амперні характеристики польового транзистора з р-п-переходом: а) передавальна, б) вихідна. Пунктиром відокремлено область насичення.

біполярних транзисторів. При цьому стік відповідає колектору, витік – емітеру, а затвор – базі біполярного транзистора. Відмінність полягає в діапазоні напруг між затвором і витком $U_{зв}$. Напруга, при якій струм стоку I_c сягає мінімального значення, називають напругою відсічки. При напругах затвор-витік, більших за $U_{відс}$, передавальна характеристика польового транзистора, представлена на Рис. 8, описується рівнянням:

$$I_c = I_0 \left(1 - \frac{U_{зв}}{U_{відс}}\right)^2, \quad (7)$$

тут I_{co} – струм стоку при $U_{зв} = 0$. 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

$$S = \frac{dI_c}{dU_{зв}}, \text{ при } U_{св} = const \quad (8)$$

Максимального значення крутизна досягає при $I_c = I_{co}$.

На Рис. 8 наведені вихідні характеристики польового транзистора. Польовий транзистор може керуватися напругою $U_{зв}$. Струм насичення стоку, як і у випадку біполярного транзистора, залежить від напруги $U_{зв}$. Для польового транзистора, як і для біполярного, можна ввести диференціальний вихідний опір

$$R_{вих} = \frac{dU_{зв}}{dI_c}, \text{ при } U_{св} = const \quad (9)$$

Серед важливих характеристик транзисторів слід також вказати граничні параметри, які не можна перевищувати. До них відносяться максимально припустимі струми і напруги, а також (особливо для потужних транзисторів) максимально припустима потужність розсіювання. На Рис. 9 зображено область припустимих значень напруг і струмів вихідної характеристики транзистора, зумовлених максимальним колекторним струмом $I_{к\text{ макс}}$, максимальною тепловою потужністю розсіювання $P_{\text{макс}}$ і максимальною напругою колектор-емітер $U_{ке}$.

Теплова потужність, розсіювана транзистором, дорівнює

$$P_{\text{роз}} \approx I_{к} \cdot U_{ке} \quad (10)$$

Вона визначає температуру T_t , до якої нагріватиметься транзистор під час роботи. За законом Ньютона для тепловіддачі у стаціонарному режимі (коли температура вже встановилася)

$$P_{\text{розс}} = \alpha \cdot S \cdot (T_{\text{тр}} - T_0), \quad (11)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, S – площа нагрітої поверхні транзистора, яка віддає тепло у навколишнє середовище, T_0 – температура навколишнього середовища.

Максимально припустимі температури колекторного переходу (а не самого корпусу транзистора!) становлять 150-200 °С для кремнієвих та 90-100 °С для германієвих транзисторів. Якщо транзистор встановити на спеціальний тепловідвід (радіатор), тобто збільшити площу тепловіддачі S , або ж обдувати його потоком повітря (збільшити α), то максимальну потужність розсіювання можна збільшити і працювати при більших значеннях струмів і напруг або при вищих температурах навколишнього середовища.

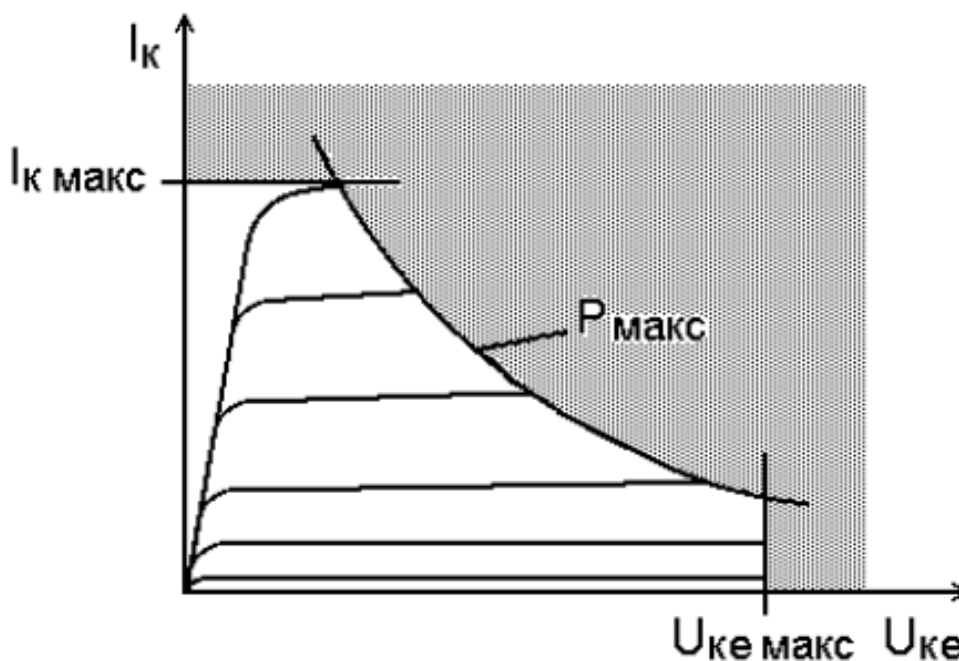


Рис. 9. Зони граничних параметрів біполярного транзистора.

3.2 Моделювання в LTspice

Зкомпонуємо схеми.

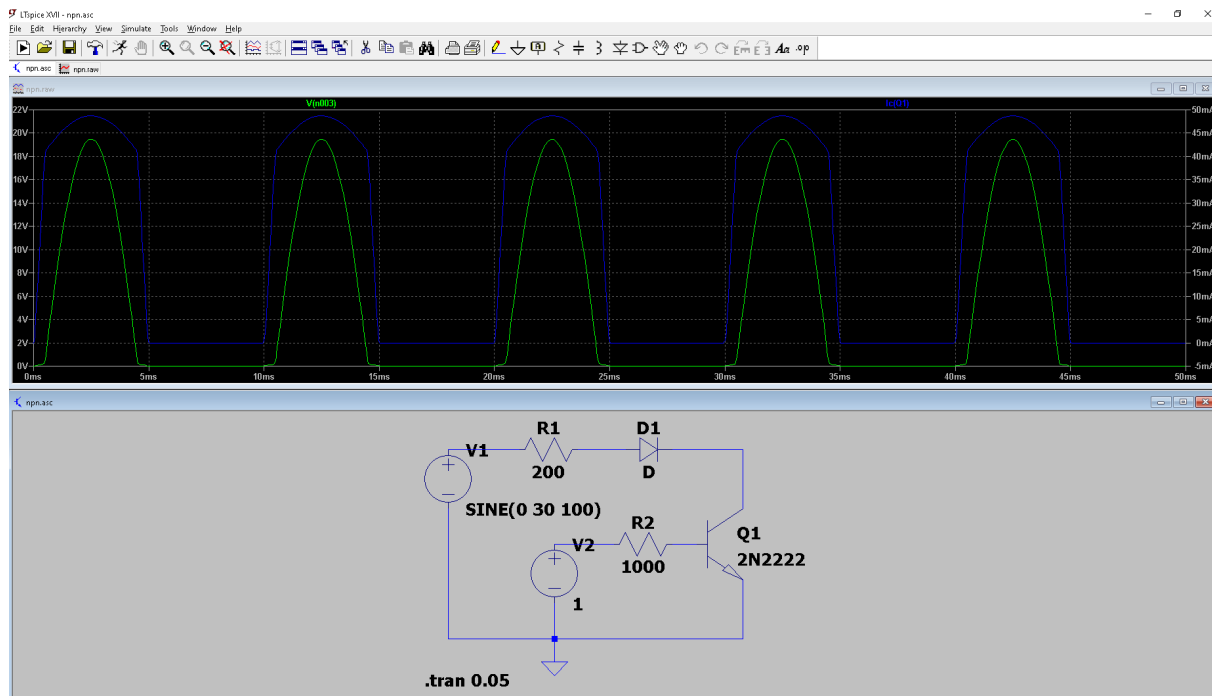


Рис. 10. прп

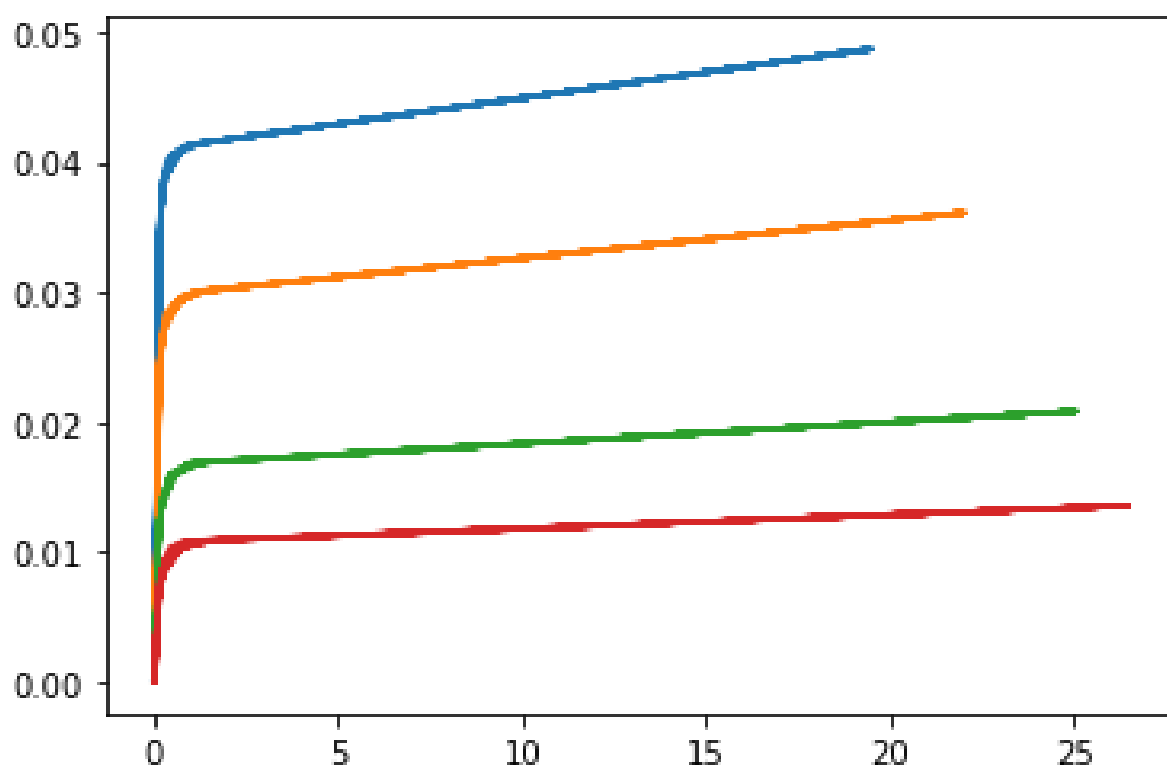


Рис. 11. ВАХ при

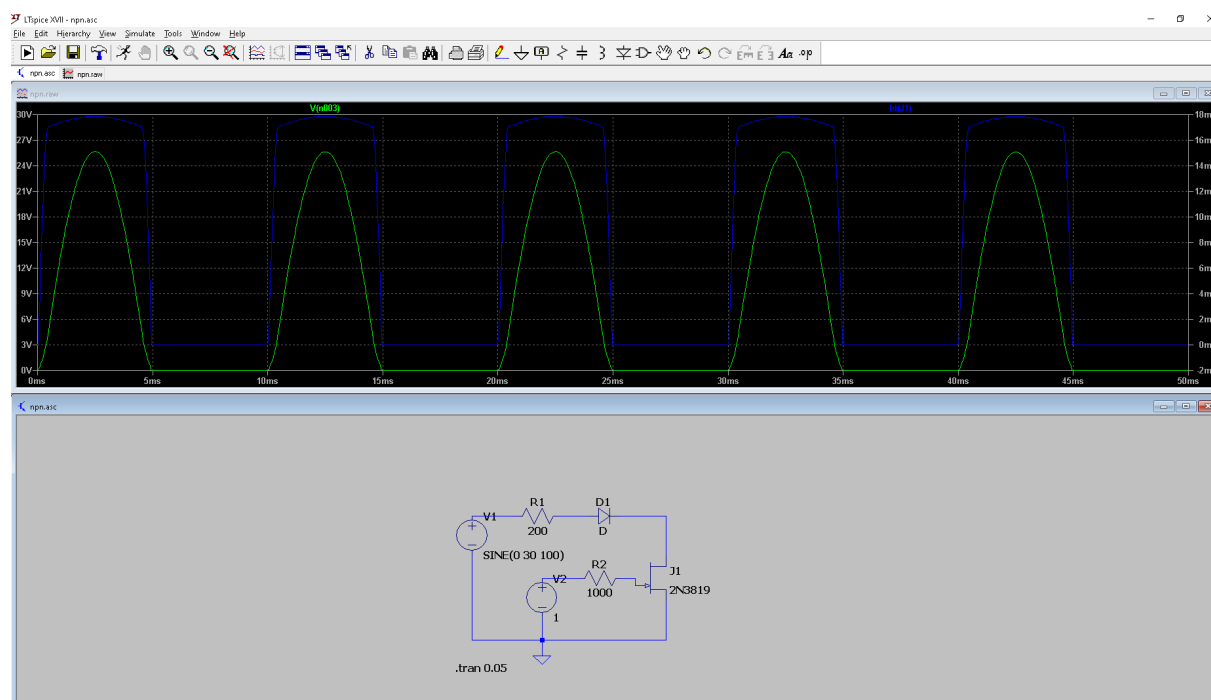


Рис. 12. мор

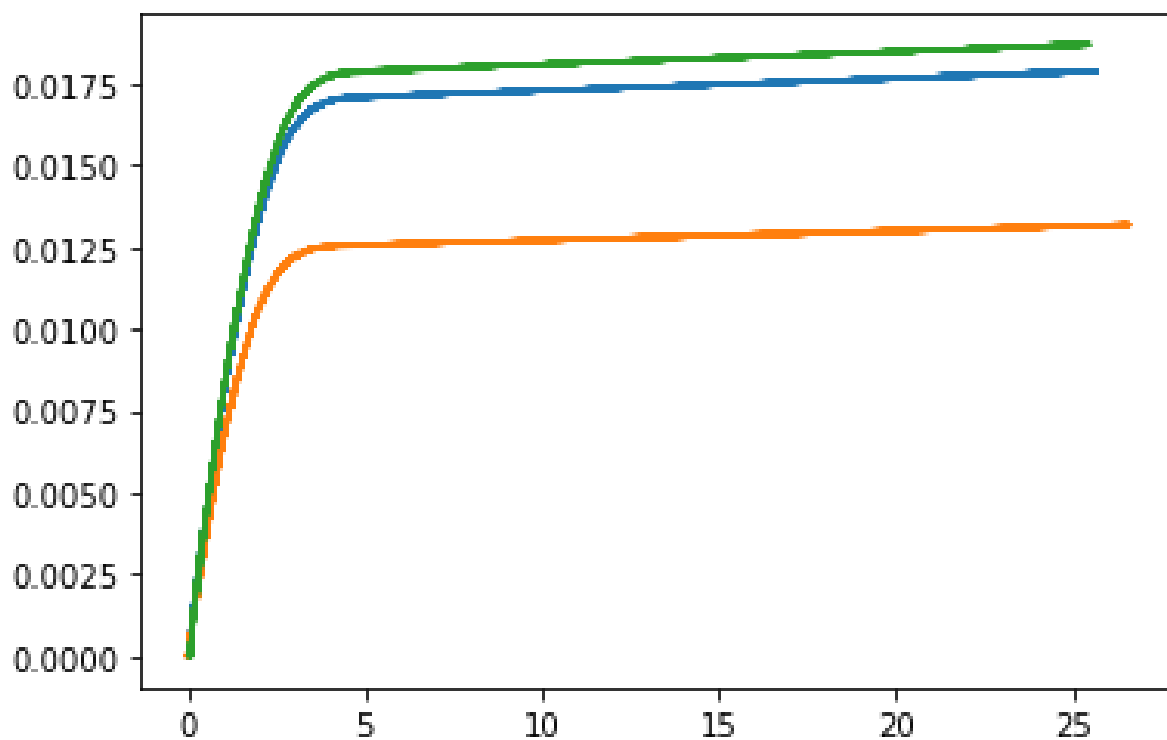


Рис. 13. ВАХ мор

4 Висновок

В ході роботи було досліджено характеристики транзисторів різних типів.