Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____Електронної та біомедичної інженерії _____
(повна назва)

Кафедра _____Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв _____
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

рівень вищої освіти_____другий (магістерський) _____

"КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ КОМПОНЕНТІВ"
_____.
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи __ЕППм 18-1 _____
_____Шевцов А.В._____
(прізвище, ініціали)

Спеціальність _171 «Електроніка»_____

Тип програми освітньо-професійна_____

Освітня програма «Електронні прилади та пристрої»

Керівник ___ доц. Галат О.Б _____
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____ Бондаренко І.М.
(підпис) (прізвище, ініціали)

2019 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії_____

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв_____

Рівень вищої освіти_____другий (магістерський)_____

Спеціальність _____171 «Електроніка»_____ _____

Тип програми _____ освітньо-професійна_____

Освітня програма_____«Електронні прилади та пристрої» _____

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри

_____І.М.Бондаренко

«____»_____2019р.

ЗАВДАННЯ
НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові_____Шевцову Арсену Вадимовичу_____
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема роботи «Комп'ютерне моделювання напівпровідникових компонентів» затверджена наказом по університету від _04_ 11_ 2019 р. № _1635 Ст____
2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії __ грудня 2019 р.
3. Вихідні дані до роботи:
3.1 програми розрахунку характеристик напівпровідникових елементів: випрямних діодів, стабилитронов, польових транзисторів, біполярних транзисторів.
3.2 Методичні вказівки з лабораторних робіт з дісципліни «Твердотільна електроніка»
3.3 Лабораторні макети з дослідження характеристик напівпровідникових елементів._____
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
4.1. Методи та засоби комп'ютерногомоделювання
4.2. Моделювання характеристик і параметрів напівпровідникових елементів за допомогою програмних засобів
4.3. Дослідження напівпровідникових приладів за допомоги програмних засобів моделювання на ПЕОМ_____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
Презентація_____
_____
_____
_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз літературних джерел	4.11.19	
	Підготовка першого та другого розділів роботи	7.11.19 – 18.11.19	
	Підготовка третього розділа роботи	23.11.19 – 30.11.19	
	Оформлення	1.12.19 – 10.12.19	
	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	10.12.19 – 12.12.19	
	Підготовка та захист атестаційної роботи		

Дата видачі завдання __03__ __листопада__2019_ р.

Студент __
(підпис)

Керівник роботи _____ _____
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містіть: 68 с., 53 рис., 2 додатки., 8 джерел.

ВОЛЬТ-АМПЕРНА ХАРАКТЕРИСТИКА, МОДЕЛЮВАННЯ, ДІОД, ТРАНЗИСТОР, НАПРУГА, СТРУМ, ПАРАМЕТР, ПРОГРАМА, ІНТЕРФЕЙС

Об'єктом роботи є моделювання в комп’ютерній програмі.

Мета роботи – розробка комп'ютерної програми для моделювання напівпровідникових компонентів.

В ході даної роботи було змодельовано напівпровідникові елементи.:
випрямний діод, стабілітрон, польовий транзистор, біполярний транзистор.

У першому розділі йде опис програм для моделювання напівпровідникових елементів.

У другому розділі наведено моделювання лабораторних робіт за допомогою програмних засобів OrCAD, Electronics Workbench.

У третьому розділі проводиться розробка комп’ютерної програми що виконує побудову характеристик, параметрів, графіків.

Результатом проведеної роботи став розроблена программа моделювання ма з твердотільної електроніки.

ABSTRACT

Explanatory note contains: 68 p., 53 fig., 2 appendices., 8 sources.

CURRENT-VOLTAGE CHARACTERISTIC, MODELING, DIODE, TRANSISTOR, VOLTAGE, CURRENT, PARAMETER, PROGRAM, INTERFACE

The object is a simulation of a computer program.

Purpose - Development of software for semiconductor design.

In the course of this work was modeled semiconductor elements .:

Rectifier Diode, Zener Diode, FET, bipolar transistor.

The first section is a description of software for modeling semiconductor elements.

The second section provides simulation labs using the software OrCAD, Electronics Workbench.

The third chapter is developing kompyeyuternoyi program that performs construction characteristics, parameters, graphs.

The result of this work was the modeling program developed mA with solid-state electronics.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ 7
ВСТУП 8
1 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ 11
2 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ 16
2.1 Можливості спеціальніх програм для моделювання лабораторних робіт 16
2.2 Моделювання параметрів елементів в Програмі Electronics Workbench 18
2.3 Схеми для дослідження вольтамперних характеристик напівпровідніковіх елементів в Програмі Electronics Workbench 23
3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ У ВИГЛЯДІ МОДЕЛЮВАННЯ НА ПЕОМ 26
3.1 Моделі, засоби і технологія дослідження напівпровідникових приладів за допомогою моделювання на ПЕОМ 26
3.2 Дослідження на ПЕОМ випрямних діодів 31
3.3 Дослідження на ПЕОМ стабилитронов 40
3.4 Дослідження на ПЕОМ польових транзисторів 45
3.5 Дослідження на ПЕОМ біполярних транзисторів 57
ВИСНОВКИ 67
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 68
ДОДАТОК А Відомість атестаційної роботи 69
ДОДАТОК Б Презентація 70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЛП УД – автоматизований лабораторний практикум з віддаленим доступом;

АПК УД – апаратно-програмний комплекс з віддаленим доступом;

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;

ВАХ – вольт-амперна характеристика;

ПЕОМ – персональна електронно-обчислювальна машина;

ПЗД – пристрій збору даних;

ПК – персональний комп'ютер;

ВСТУП

Комп'ютерне моделювання є в даний час найважливішою складовою частиною процесу проектування. Це пояснюється наступними причинами:

а) необхідністю скорочення термінів розробки нових електронних пристроїв;

б) наявністю ефективних алгоритмів і програм комп'ютерного моделювання;

в) розвинений теорією математичного моделювання електронних компоненті.

Сучасні програми моделювання представляють віртуальні лабораторії, що включають великі бібліотеки електронних компонентів. Вони дають можливість студентові перевірити, чи задовольняє спроектоване пристрій вимогам технічного завдання, коли використовуються реальні компоненти з характеристиками, відмінними від ідеальних. Багато програм дозволяють автоматизувати всі стадії проектування електронних пристроїв, включаючи підготовку принципових схем, моделювання процесів в аналогових і цифрових ланцюгах, компоновку і трасування друкованих плат, редагування і розширення бібліотек компонентів.

Програми схемотехнічного моделювання широко використовуються для автоматизації проектування інтегральних схем, оскільки фізичне моделювання ІС пов'язано з великими матеріальними витратами. Для пристроїв енергетичної електроніки проблема комп'ютерного моделювання є не менш актуальною. Це пояснюється тим, що імпульсні перетворювачі містять елементи з різко нелінійними характеристиками. Аналітичний розрахунок таких пристроїв є досить трудомістким.

Сучасна електроніка охоплює практично всі сфери побутової і професійної діяльності людини. Вивчення її основ передбачено більшістю освітніх програм у сфері вищої, середньої та початкової професійної освіти. Базовими компонентами сучасної електроніки є напівпровідникові прилади і створювані на їх основі напівпровідникові інтегральні мікросхеми. Теоретичне і практичне вивчення

напівпровідникових приладів здійснюється в рамках навчальних дисциплін «Твердотельная електроніка», «Вступ до спеціальності», «Напівпровідникові прилади», «Введення в мікропроцесори і цифрові схеми», «Системи автоматичного управління та обробки даних» та ін. Лабораторні практикуми цих дисциплін включають в себе дослідження найбільш широко застосовуваних (базових) видів напівпровідникових приладів: випрямних діодів, польових транзисторів.

Виконання лабораторних досліджень в системе АЛП УД, здійснюється за допомоги мережевих телекомунікаційніх технологій з персонального комп'ютера, віддаленого на будь-яку відстань від місця размещения дістанційно керованого досліджуваного об'єкта (лабораторного макета, что входити до складу АПК), и пов'язаних з ним комп'ютерних засобів вимірювання і управління.

У порівнянні з використанням традіційного лабораторного практикуму застосування дістанційніх комп'ютерних технологій вимірювання та управління істотно скорочує необхідній обсяги обладнання, розширює вимірювальні и Дослідницькі возможности практикуму, підвіщує его продуктивність. Система АЛП УД на базі АПК УД «Електроніка» дозволяє проводити лабораторні дослідження в розрахованому на много користувачів режімі (режим клієнт-сервер) як з навчальна група в спеціалізованої комп'ютерної лабораторії або класі, так и індивідуально з будь-которого клієнтського персонального комп'ютера шляхом підключення до сервера системи АЛП УД з помощью мереж Internet / Intranet.

Система АЛП УД Включає в себе експериментальні дослідження, что віконуються с помощью АПК УД «Електроніка», и дослідження, проведені с помощью моделювання на ПЕОМ на основе демоверсії системи схемотехнічного моделювання OrCAD 9.1

Засоби АПК УД «Електроніка» и моделювання на ПЕОМ забезпечуються наступні лабораторні дослідження:

а) вимір и дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) и параметрів напівпровідніковіх приладів;

б) дослідження технологічного розкіду ВАХ и параметрів напівпровідніковіх приладів;

в) дослідження роботи напівпровідніковіх приладів на змінному струмі.

Моделювання на ПЕОМ здійснюється на основі математичних моделей досліджуваніх в лабораторному практікумі напівпровідніковіх приладів. Моделювання охоплює не тільки завдання дослідження, експериментально вірішуються засоби АПК «Електроніка», но і не реалізовані ними завдання вивчення температурних, частотних и імпульсніх властівостей напівпровідніковіх приладів, їх поведінкі при значеннях струмів и напруг, около або перевіщують гранично допустимі.

Мета роботи – розробка комп'ютерної програми для моделювання напівпровідникових компонентів.

1 МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОМПЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

В даний час на ринку програмного забезпечення, призначеного для проектування електронних ланцюгів і пристроїв, можна нарахувати кілька десятків спеціалізованих пакетів. Перерахуємо деякі з них.

Програма Pspice. Програма є модифікацією програми аналізу електронних кіл SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis). В даний час її вважають еталонної програмою моделювання електронних ланцюгів і пристроїв.

У перших версіях Pspice вихідні дані про ланцюги готувалися в текстовій формі у вигляді списку з'єднань (netlist). Результати моделювання представлялися в текстовій формі. Пізніше з'явився графічний редактор Schematics, що дозволяє створювати і редагувати креслення принципових схем.

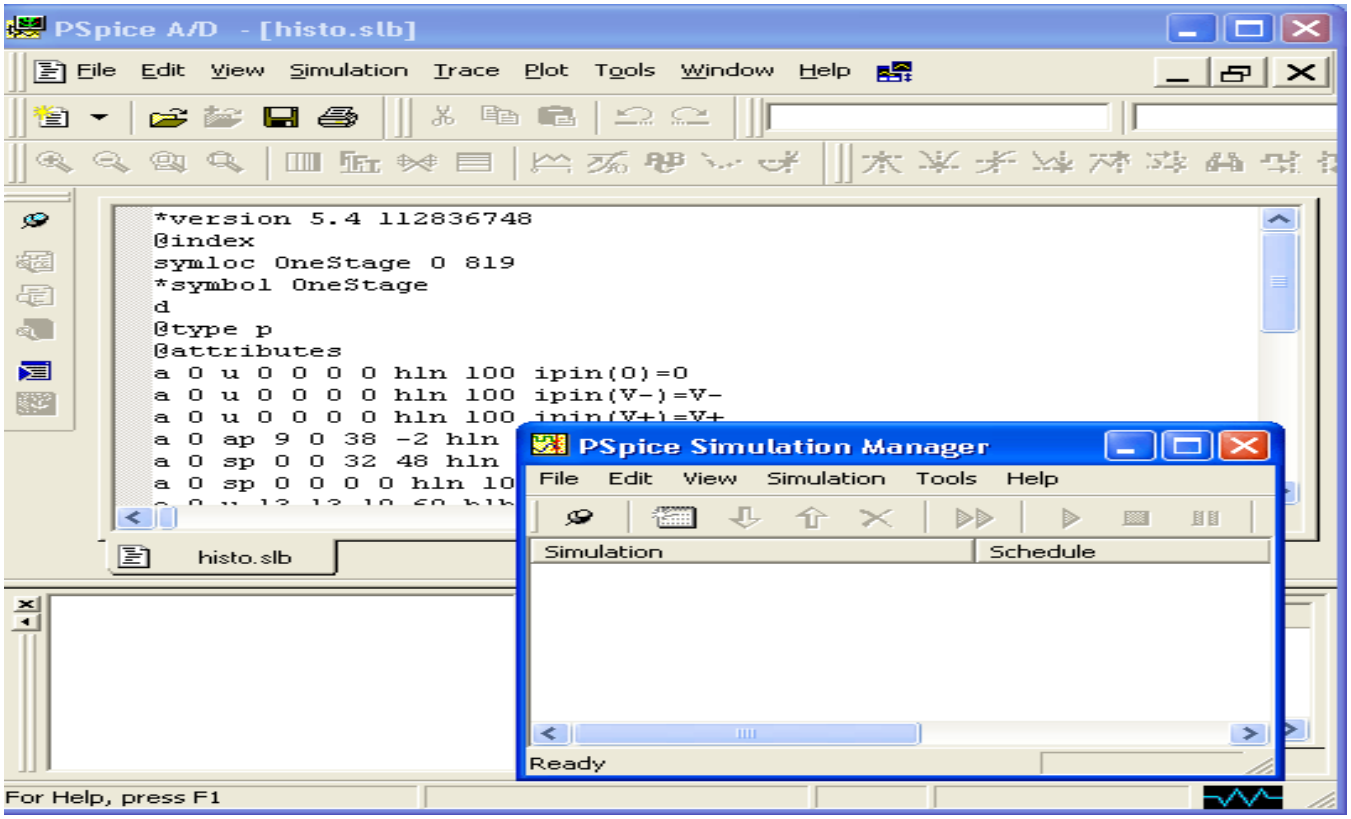


Рисунок 1.1 – Вікно інтерфейсу програми Pspice

Програма Micro-CAP (фірма Spectrum Software). Програма має зручний графічний редактор, що дозволяє створювати і редагувати принципові схеми аналогових і цифрових пристроїв (рис. 1.2).

До складу пакета Micro-CAP входить програма розрахунку параметрів моделей аналогових елементів за результатами експериментальних досліджень.

Основні види аналізу, що виконуються програмою:

а) розрахунок статичного режиму по постійному струму;

б) розрахунок частотних характеристик линеаризованной ланцюга;

в) розрахунок реакції в тимчасовій області при довільних вхідних впливах;

г) аналіз шумів і параметричної чутливості;

д) багатоваріантний аналіз, включаючи статистичний аналіз методом Монте-Карло;

Програма дозволяє моделювати як аналогові, так і змішані аналого-цифрові пристрої.

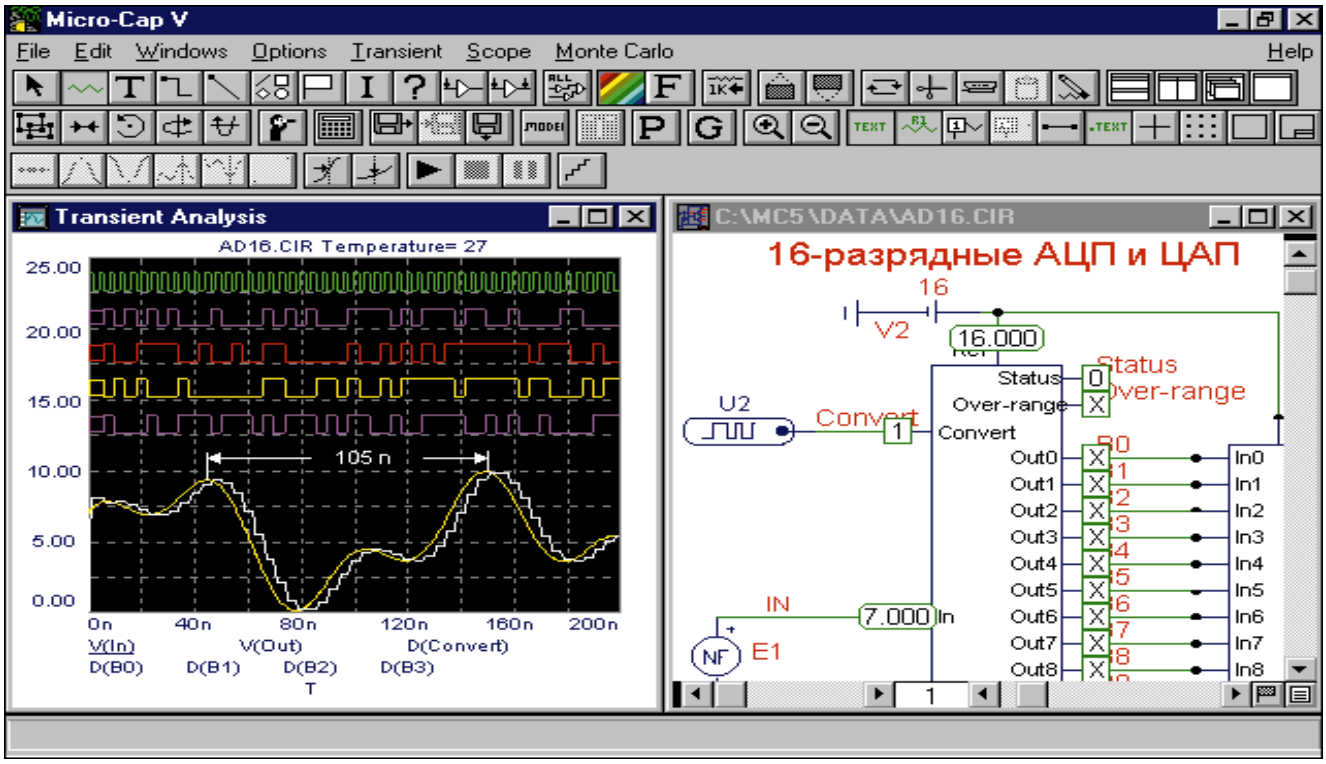


Рисунок 1.2 – Вікно інтерфейсу програми Micro-CAP

Програма Multisim (фірма National Instruments). Перші версії програми, що з'явилися в дев'яності роки, мали назву Electronics Workbench. Програма мала дуже простий і інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс. Цим пояснюється її популярність в навчальних закладах. Останні версії програми носять назву Multisim (рис. 1.3).

Особливістю програми є наявність віртуальних вимірювальних приладів, що імітують реальні аналоги. По набору приладів, включених в досліджувану схему, програма вибере автоматично режим моделювання (розрахунок тимчасових або частотних характеристик, режим постійного струму). Останні версії програми використовують математичні модулі і моделі компонентів SPICE.

Важлива особливість програми полягає в тому, що Multisim підтримує взаємодію з графічним середовищем LabVIEW, призначеної для розробки програмно-апаратних засобів вимірювання і управління.

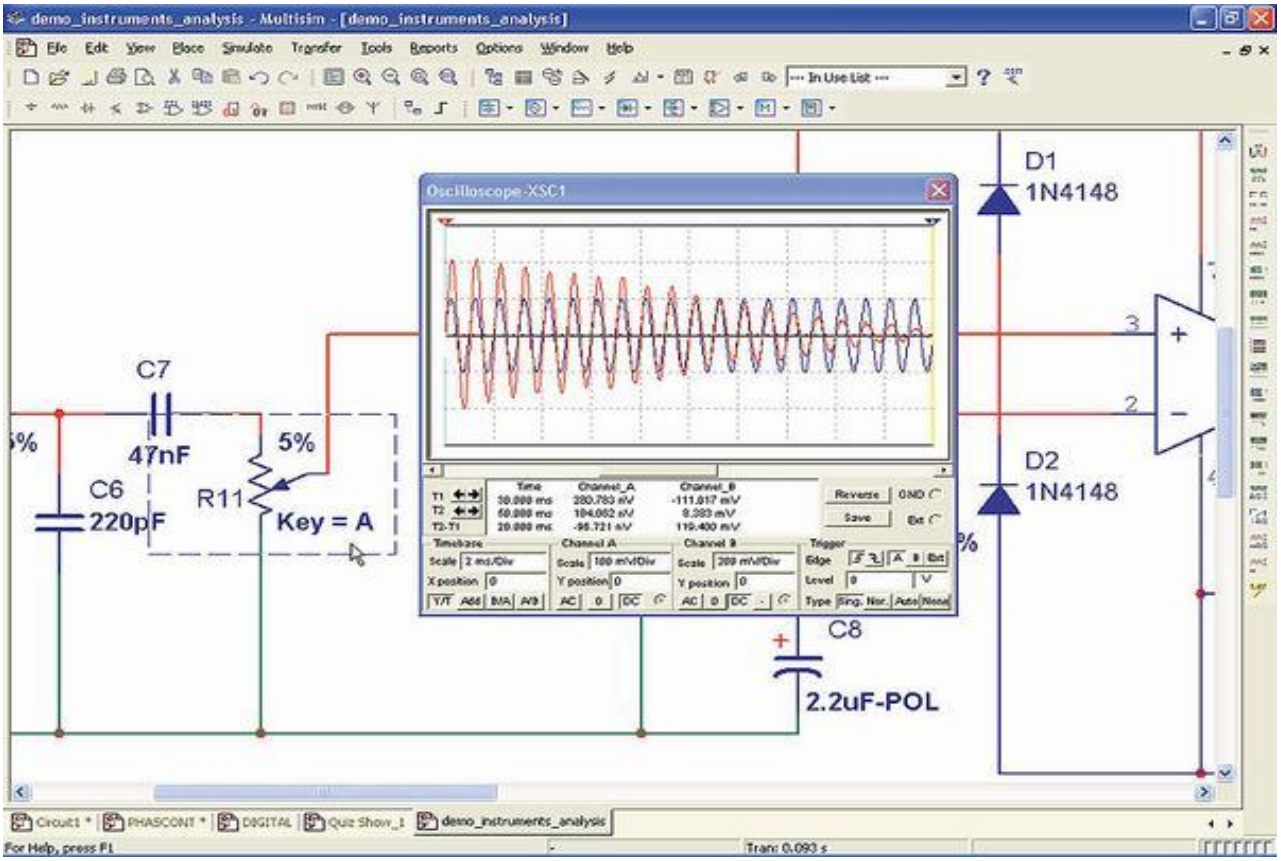


Рисунок 1.3 – Вікно інтерфейсу програми Multisim

Програма Circuit Maker (фірма Protel International) призначена для моделювання аналогових, цифрових і змішаних аналого-цифрових пристроїв (рис.1.4). Вона має зручний графічний інтерфейс, що дозволяє швидко підготувати електричні схеми аналогових і цифрових пристроїв. Результати моделювання виводяться в графічній формі, у вигляді осцилограм і графіків частотних характеристик. Є студентська версія програми, яка розповсюджується безкоштовно. Дозволено використання цієї версії на домашніх комп'ютерах студентів.

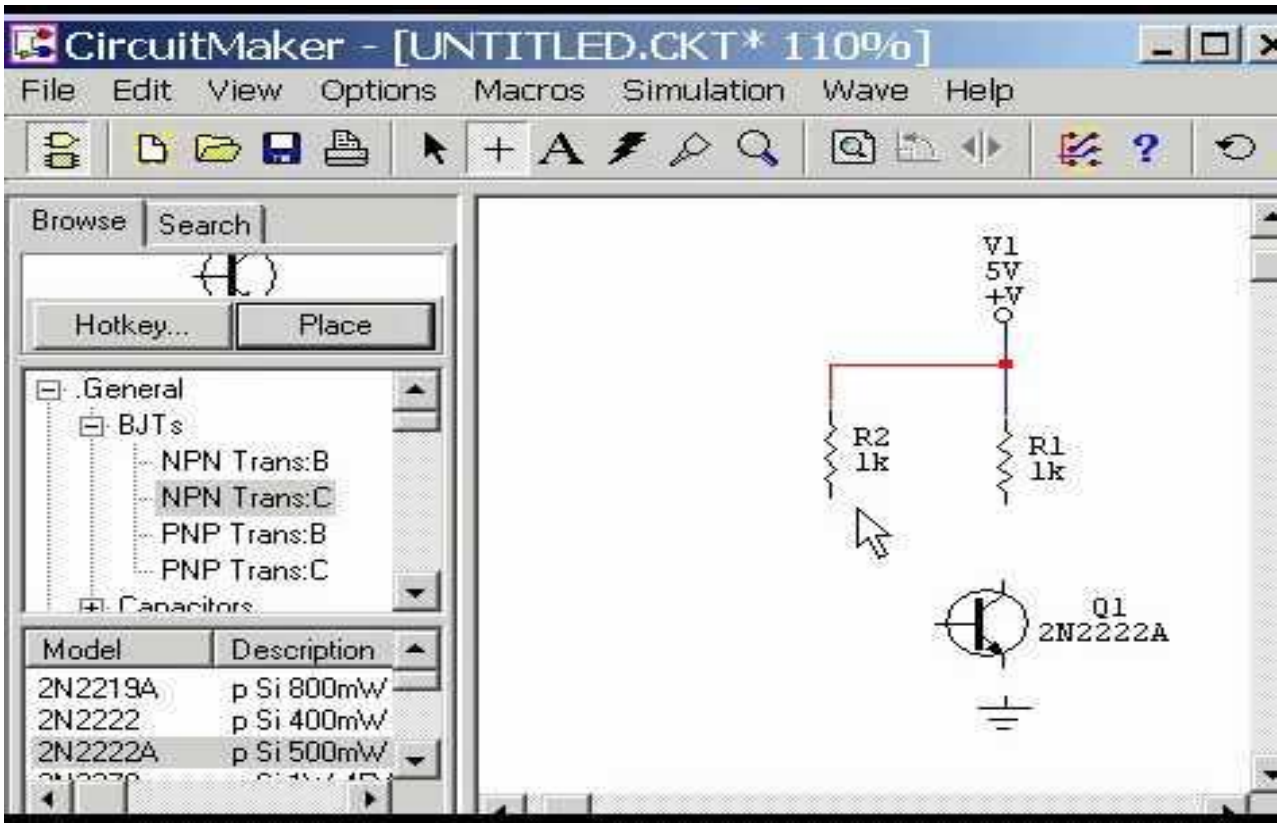


Рисунок 1.4 – Вікно інтерфейсу програми Circuit Maker

Програма PSIM (фірма Powersimtech). Ця програма спеціально розроблена для моделювання пристроїв енергетичної електроніки. Програма має простий і зручний у використанні графічний інтерфейс (рис. 1.5). Математичний модуль PSIM використовує ефективні алгоритми аналізу нелінійних ланцюгів.

Базовий пакет PSIM включає схемний редактор PSIM schematic program, що моделює програму PSIM simulator і графічний постпроцесор Simview.

Основні особливості програми PSIM

а) аналіз частотних характеристик;

б) можливість роботи з пакетом Matlab;

в) розрахунок як тимчасових, так і частотних характеристик;

г) велика бібліотека моделей силових компонентів.

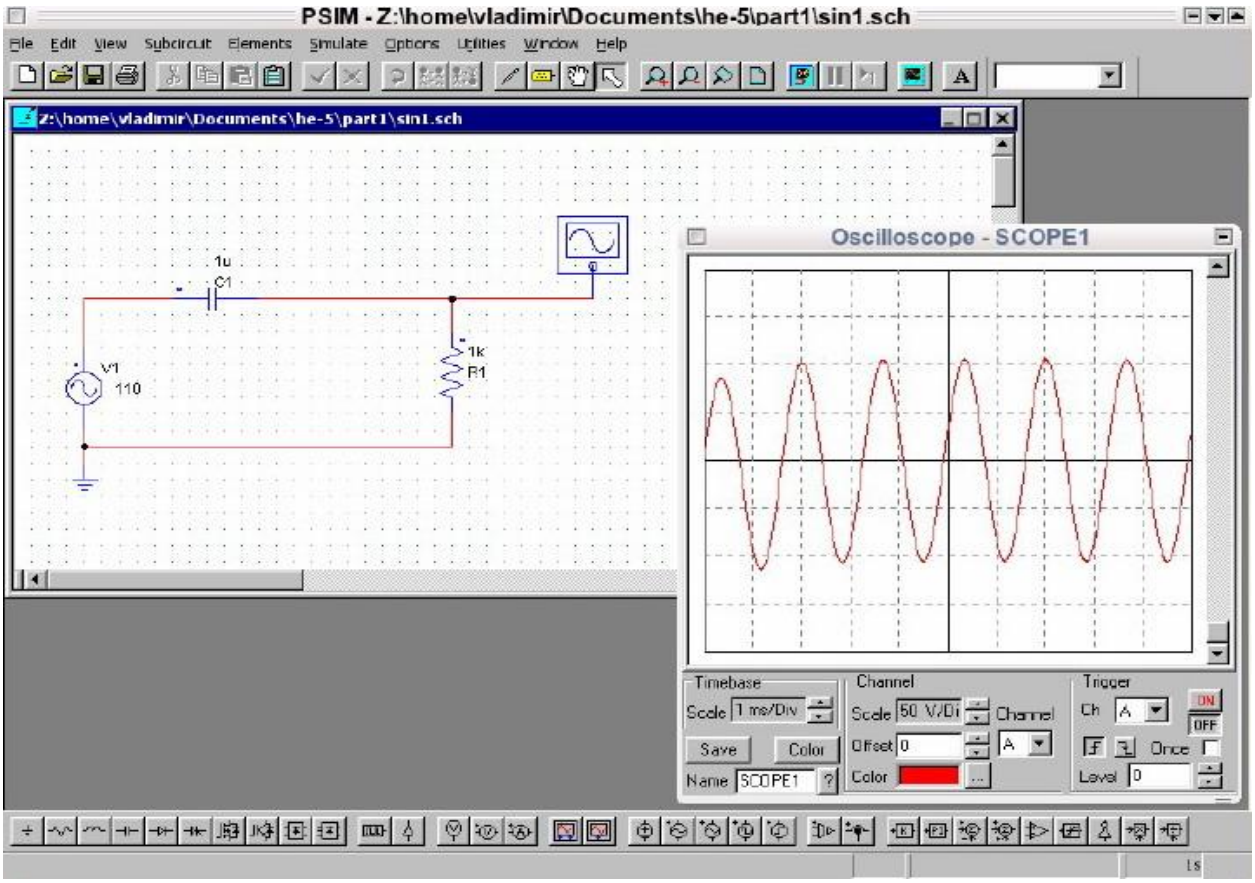


Рисунок 1.5 – Вікно інтерфейсу програми PSIM

2 МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ

2.1 Можливості спеціальних програм для моделювання лабораторних робіт

Лабораторний практикум з експериментального дослідження напівпровідникових приладів засобами АПК УД «Електроніка» доповнюється моделюванням їх роботи на ПЕОМ. Математичне моделювання дозволяє проводити дослідження, які не потребують складного і дорогого обладнання. У свою чергу експериментальні дослідження дозволяють оцінити адекватність і точність використовуваних математичних моделей і їх параметрів для різних напівпровідникових приладів.

Дослідницькі можливості моделювання на ПЕОМ що визначаються програмними засобами, за допомогою яких воно здійснюється, а також математичними моделями електронних компонент, які вони використовують. В даний час існує досить багато спеціальних програм або систем автоматизованого проектування радіоелектронних засобів (САПР РЕЗ), ефективно вирішують завдання моделювання напівпровідникових приладів. До них відносяться системи MicroCAP, Electronic Workbench, OrCAD, PCAD, Protel, DesingLab і ін. Основою або ядром цих САПР є підсистема моделювання PSpice. В системі АЛП УД «Електроніка» використовується демонстраційна версія системи наскрізного автоматизованого проектування електронних засобів OrCAD 9.1 (рис. 2.1).

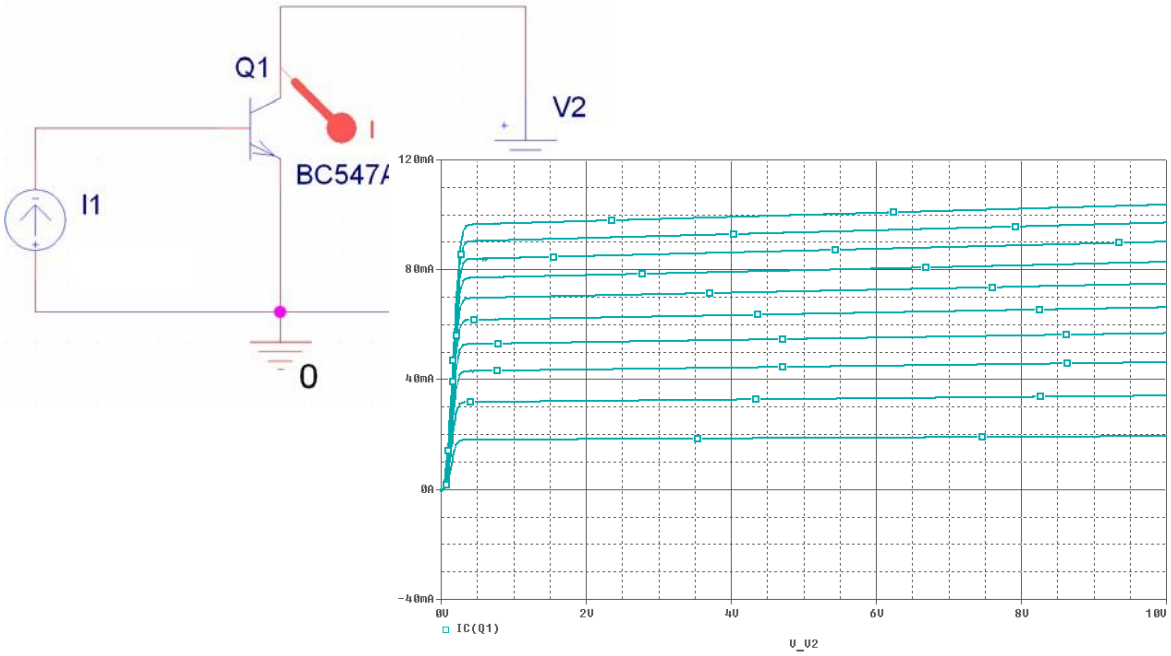


Рисунок 2.1 – Побудова вихідних ВАХ біполярного транзистора засобами системи наскрізного автоматизованого проектування електронних засобів OrCAD 9.1

Програмні засоби моделювання дозволяють на основі математичних моделей напівпровідникових приладів, що застосовуються в об'єктних модулях АПК УД «Електроніка» виконати дослідження електричних характеристик напівпровідникових приладів, що включають:

а) розрахунок середньостатистичних ВАХ і параметрів напівпровідникових приладів, оцінку відповідності результатів моделювання і вимірювання, підвищення точності моделювання шляхом використання експериментально знаходять параметрів математичної моделі;

б) аналіз режимів роботи напівпровідникових приладів за постійним струмом;

в) аналіз параметрів і характеристик електронних пристроїв (випрямляча, стабілізатора напруги, підсилювального каскаду на біполярному іполевом транзисторах) на основі досліджуваних напівпровідникових приладів в тимчасовій області;

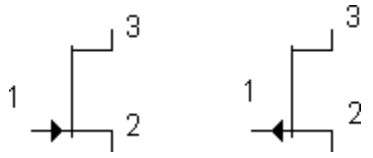
г) аналіз частотних залежностей параметрів і характеристик досліджуваних напівпровідникових приладів;

д) статистичний аналіз параметрів і характеристик напівпровідникових приладів за методом Монте-Карло;

е) аналіз температурних залежностей характеристик і параметрів напівпровідникових приладів.

2.2 Моделювання параметрів, елементів в програмі Electronics Workbench

У бібліотеці компонентів програми EWB [4,5] транзистори з управ ляющим pn-перехід показаний двома прикладами: n-канальним і p- канальним і показані на рис. 2.1а і 2.1б, відповідно. Де 1 - за- твор (gate) - керуючий електрод; 2 -істок (source) - електрод, від ко-торого починають рух головні носії (в першому типі - електрони, в другому - дірки); 3 - стік (drain) - електрод, що приймає ці носи тели.



а) б)

а - n - канальні, б - р - канальні

Рисунок 2.2 – Польові транзистори з керуючим pn-переходом

Параметри цих транзисторів задаються за допомогою діалогів гового вікна, представленого на рис. 2.2, і перераховані нижче:

а) напруга відсічення, В (Threshold voltage VTO [VTO]) - напруга між затвором і витоком польового транзистора р-п - переходом або з ізольованим затвором, що працюють в режимі збіднення, при якому струм стоку досягає заданого низького напруги. Для транзисторів з ізолюючим- ванним затвором, що працюють в режимі збагачення, цей параметр називається граничною напругою;

б) коефіцієнт пропорційності, А / В2 (Transconductance coeffi- cient B [KP]);

в) параметр модуляції довжини каналу, 1 / В (Channel-length modulation Im [LAMBDA]);

г) об'ємний опір області стоку, Ом (Drain ohmic resistance Rd [RD]);

д) об'ємний опір області витоку, Ом (Source ohmic resis- tance Rs [RS]);

е) струм насичення pn-переходу, А (Gate-junction saturation current Is [IS]) - тільки для польових транзисторів з p- n-переходом;

є) ємність між затвором і стоком при нульовому зміщенні, Ф (Zero- bias gate-drain junction capacitance Cgd [CGD]);

ж) ємність між затвором і витоком при нульовому зміщенні, Ф (Zero- bias gate-source junction capacitance Cgs [CGS]);

У програмі Multisim кількість параметрів для польових транзісторів зросло. їх роль таке ж, як і для розглянутих раніше біполярних транзисторів. За аналогією з біполярними транзисторами разли- сподіваються три схеми включення польових транзисторів: із загальним затвором (ОЗ), із загальним витоком (ОІ) і з загальним стоком (ОС).

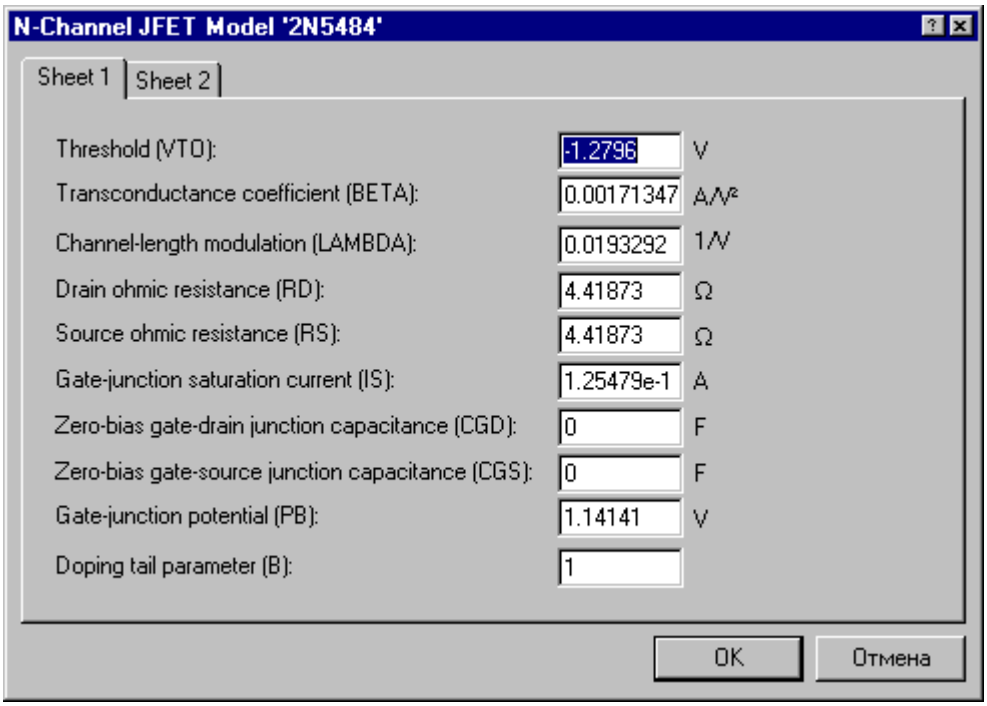
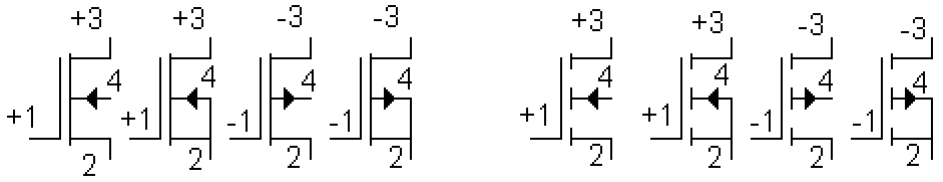


Рисунок 2.3 – Вікно установки параметрів польових транзисторів з керуючим pn-переходом

Як і польові транзистори з керуючим pn-переходом, МДП- транзистори при малих напругах стік-витік поводяться подібно ли Нейн опору. При підвищенні цієї напруги ширина каналу зменшується внаслідок падіння на нього напруги і зменшенні напруженості електричного поля. Особливо сильно це проявляється в тій частині каналу, яка знаходиться поблизу стоку. Перепади напруги, створювані струмом стоку Id, призводять до нерівномірного розподілу зсуву на затворі в довжину каналу, причому воно зменшується в міру настання до стоку.

Головною перевагою МДП-транзисторів в порівнянні з біполяр- ними є мале падіння напруги на них при комутації малих сигналів. Так, якщо в біполярних транзисторах в режимі насичення напруга колектор-емітер принципово не може бути менше кількох десятих часток вольт, то для МДП-транзисторів при малих токах стоку цю напругу при роботі транзистора в початковій області вихідний вольт-амперної характеристики (ВАХ) може бути зведене до мізерно малою величині.

У бібліотеці електричних компонентів програми EWB МДП-транзистори з вбудованим каналом представлені двома зразками: n-канальним і p- канальним, попарно показаними на рис. 2.4, а, на якому цифрою 4 позначена підкладка, інші позначення аналогічні позначенням на рис. 2.3.



а) б)

а - вбудований канал, б - індукований канал

Рисунок 2.4 – МДП-транзистори з вбудованим і індукованим каналом

Кожен тип МДП-транзистора показаний в двох варіантах: з від- діловою виводом підкладки і загальним виводом підкладки і витоку. Діалогове вікно МДН-транзисторів установки параметрів МДН-транзисторів показано на рис. 2.5.

У порівнянні з рис. 2.3 в ньому містяться додаткові параметри, призначення яких полягають в наступному:

а) поверхневий потенціал, В (Surface potential ph [PHI]);

б) коефіцієнт впливу потенціалу підкладки на порогове напряже- ня, В1 / 2 (Bulk-threhold parametr g [GAMMA]);

в) ємність між затвором і підкладкою, Ф (Gate-bulk capacitance Cgb [CGB]);

г) ємність донної частини переходу стік-підкладка при нульовому зміщення ванні, Ф (Zero - bias bulk-drain junction capacitance Cbd [CBD]);

д) ємність донної частини переходу витік-підкладка при нульовому кош- щении, Ф (Zero-bias bulk-source junction capacitance Cbs [CBS]);

У більш пізніх версіях програми EWB кількість параметрів мо- делей МДП-транзисторів збільшено.

До додатково введеним відносяться наступні параметри:

LD - довжина області бічної дифузії, м;

RSH - питомий опір дифузійних областей витоку і стоку. Ом;

JS - щільність струму насичення переходу стік (витік) -підкладка, А / м2;

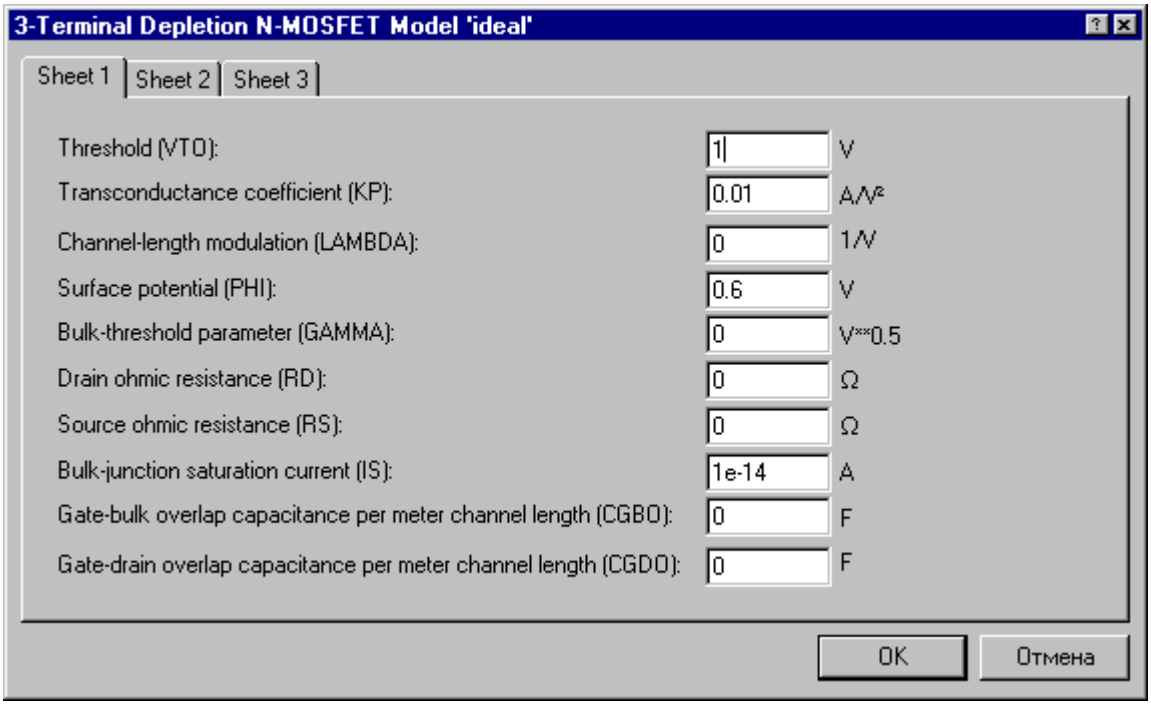


Рисунок 2.5 – Діалогове вікно установки параметрів МДН-транзисторів

CJ - питома ємність донної частини p-n-переходу стік (витік) - підкладка при нульовому зміщенні, Ф / м2;

CJSW - питома ємність бічної поверхні переходу стік (исток) -підкладка, Ф / м;

MJ - коефіцієнт плавності переходу підкладка-стік (витік);

CGSO - питома ємність перекриття затвор-витік (за рахунок боко- виття дифузії), Ф / м;

CGDO - питома ємність перекриття затвор-стік на довжину каналу (За рахунок бічної дифузії), Ф / м;

CGBO - питома ємність перекриття затвор-підкладка (внаслідок виходу області затвора за межі каналу), Ф / м;

NSUB - рівень легування підкладки,;

NSS - щільність повільних поверхневих станів на кордоні кремній - подзатворного оксид, 1 / см2;

TOX - товщина оксиду, м;

TPG - легування затвора; +1 - домішкою того ж типу, як і для підкладки, -1 - домішкою протилежного типу, 0 - металом;

UO - рухливість носіїв струму в інверсному шарі каналу, см2 / В / с;

FC - коефіцієнт нелінійності бар'єрної ємності прямо кош- щенного переходу підкладки.

2.3 Схеми для дослідження вольтамперних характеристик напівпровідникових елементів в програмі Electronics Workbench.

Для дослідження сімейства вихідних ВАХ польового транзистора в схемі OI може бути використана схема на рис. 2.6. В ній є джерело напруги затвор-витік Ug, досліджуваний транзистор VT, джерело живлення Ucc, вольтметр Ud для контролю напруги стік-витік і ампер- метр Id для вимірювання струму стоку.

Схеми, наведеної на рис. 2.7, зручніше користуватися в режимі DC Sweep.

Вихідна ВАХ знімається при фіксованих значеннях Ug шляхом з- трансформаційних змін напруги Ud і вимірювання струму стоку Id.

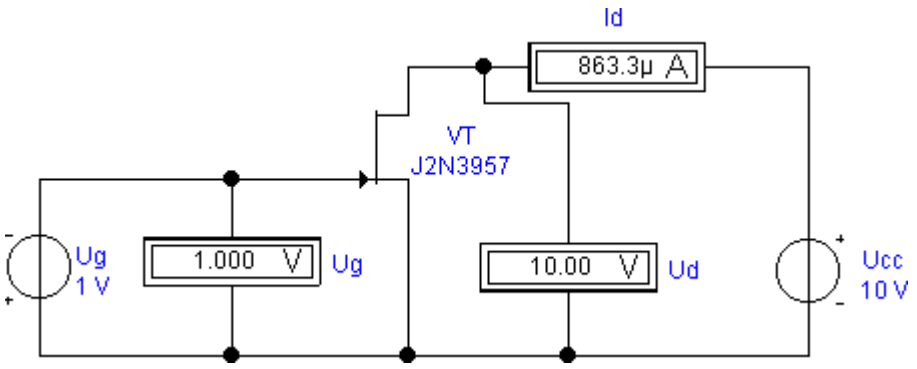


Рисунок 2.6 – Схема для дослідження ВАХ польового транзистора з керуючим p-n-переходом

Маючи в своєму розпорядженні характеристиками Id = f (Ud), дозволено дізнатися крутизну S = dId / dUg, що є однією з найважливіших характеристик польового тран- зістора як підсилювального приладу.

Для дослідження характеристик МДП-транзисторів використовується схема, представлена на рис. 3.3.

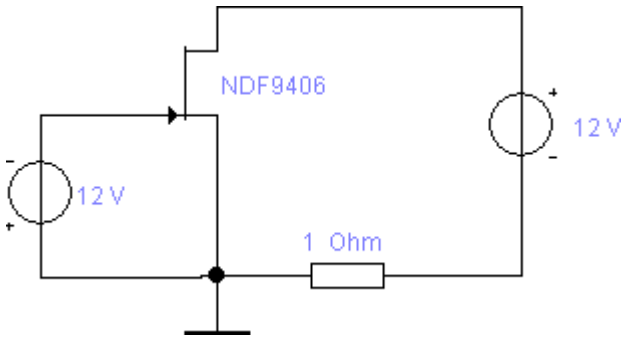


Рисунок 2.7 – Схема для дослідження ВАХ в програмі Electronics Workbench

За допомоги схеми отримуємо сімейство вихідних характеристик МДП - транзисторів при фіксованих значеннях напруги на затворі Ug і підкладки Ub. Маючи в своєму розпорядженні такими характеристиками, за допомогою яких можна визначити крутизну транзистора S при управлінні з боку затвора, а також крутість при керуванні з боку підкладки Sb = dId / dUb; статичний коеффіці- ент

посилення M = dUd / dUg; вихідна диференціальне опір RRd = dUd / dId і інші параметри.

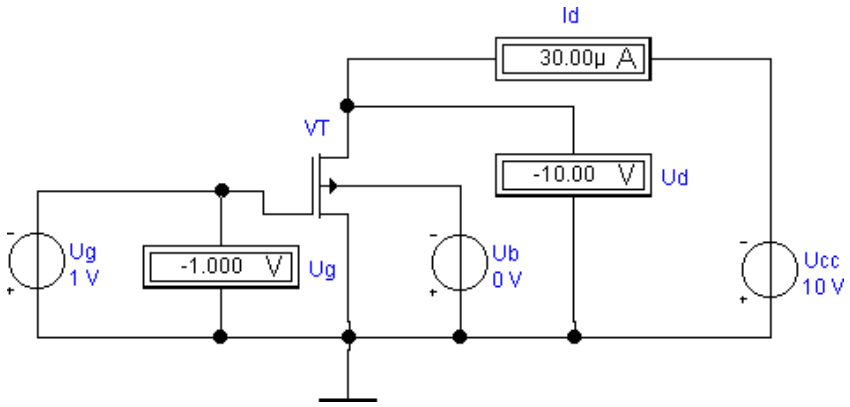


Рисунок 2.8 – Схема для дослідження характеристик МДП-транзисторів

Стокову характеристику (залежність струму стоку від напруги між) витоком і стоком) отримують при фіксованій напрузі на затворі. Зі зростанням напруги струм стоку спочатку зростає, а потім це підвищення сповільнюється. Явище, подібне насиченню, пояснюється тим, що зі зростанням напруги на стоці одночасно росте зворотня напруга на p-n-переході, і канал звужується (його опір зростає)

3 ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ ЗА ДОПОМОГИ МОДЕЛЮВАННЯ НА ПЕОМ

3.1 Моделі, засоби і технологія дослідження напівпровідникових приладів за допомогою моделювання на ПЕОМ

У лабораторному практикумі з дослідження напівпровідникових приладів в якості програмного засобу моделювання використовується демонстраційна версія системи автоматизованого проектування OrCAD 9.1 [8]. Моделювання електронних пристроїв на ПЕОМ грунтується на математичних моделях, що утворюють їх компонентів.

Для проведення досліджень на ПЕОМ повинна бути попередньо встановлена демонстраційна версія системи OrCAD 9.1 з компакт-диска, що йде в комплекті з даними посібником. Вказівки з інсталяції системи наведені в файлі Install.doc. Також з компакт-диска на жорсткий диск ПЕОМ потрібно скопіювати папку Electronica. При копіюванні в будь-яку іншу папку потрібно переконатися, що шлях до цієї папки прописаний латинськими буквами.

Моделювання електронних пристроїв в системі OrCAD здійснюється на основі їх еквівалентних схем вимірювань, які створюються за допомогою схемотехнічного редактора Capture. У лабораторному практикумі з метою скорочення непродуктивних витрат часу на виконання робіт користувачеві представляються попередньо підготовлені та апробовані файли проектів з еквівалентними схемами вимірювань для кожного з досліджуваних напівпровідникових приладів і виконуваних лабораторних завдань. Вони включають файли проектів для дослідження ВАХ напівпровідникових приладів, файли проектів для дослідження технологічного розкиду і файли проектів для дослідження роботи напівпровідникових приладів на змінному струмі. Файли проектів розміщені в папці Electronica.

Схеми вимірювань для дослідження ВАХ напівпровідникових приладів

(файли проектів Diode1-1, Diode1-2, Diode2-1, Diode2-2, Stab1-1, Stab1-2, Stab2-1, Stab2-2, Ptr1-1, Ptr1-2 , Ptr2-1, Ptr2-2, Btr1- 1, Btr1-2, Btr2-1, Btr2-2) побудовані на основі схем вимірювання ВАХ методом вольтметра-амперметра. Засоби OrCAD забезпечують безпосереднє визначення струму в зазначеній маркером гілки схеми, що дозволяє використовувати найпростіші схеми вимірювання ВАХ з керованими джерелами ЕРС і струму, які, на відміну від схем вимірювання, не містять струмовимірювальних резисторів.

Схеми вимірювань для дослідження роботи напівпровідникових приладів на змінному струмі (файли проектів Diode3- 1, Diode3-2, Stab3-1, Stab3-2, Ptr3-1, Ptr3-2, Btr3-1, Btr3-2) безпосередньо відповідають схемам вимірювання об'єктних модулів АПК «Електроніка».

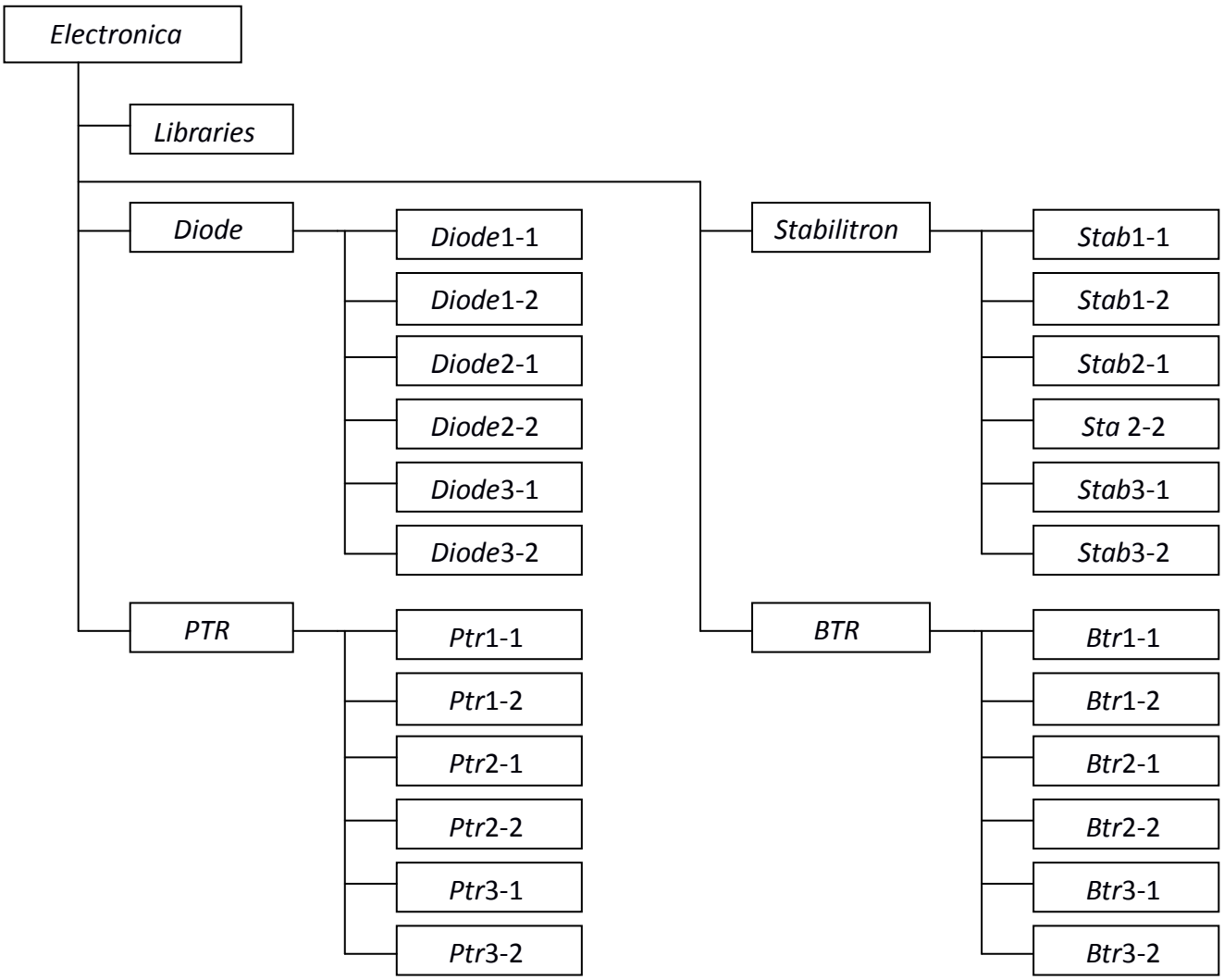


Рисунок 3.1 – Структура каталогів

Моделювання додатково передбачає дослідження температурних і частотних властивостей напівпровідникових приладів, які не реалізуються засобами АПК УД «Електроніка». Зміст і обсяг проведених досліджень можуть також задаватися викладачем в індивідуальному порядку.

При проведенні досліджень в автономному режимі необхідно:

а) запустити графічний редактор схем Capture (Пуск - Програми -OrCAD demo - Capture CIS Demo);

б) відкрити файл проекту, відповідний проведеним дослідженням (меню File - Open - Project).

Після запуску файлу проекту відкривається менеджер проекту, який знаходиться в лівій частині екрана програми Capture (рис. 3.2).

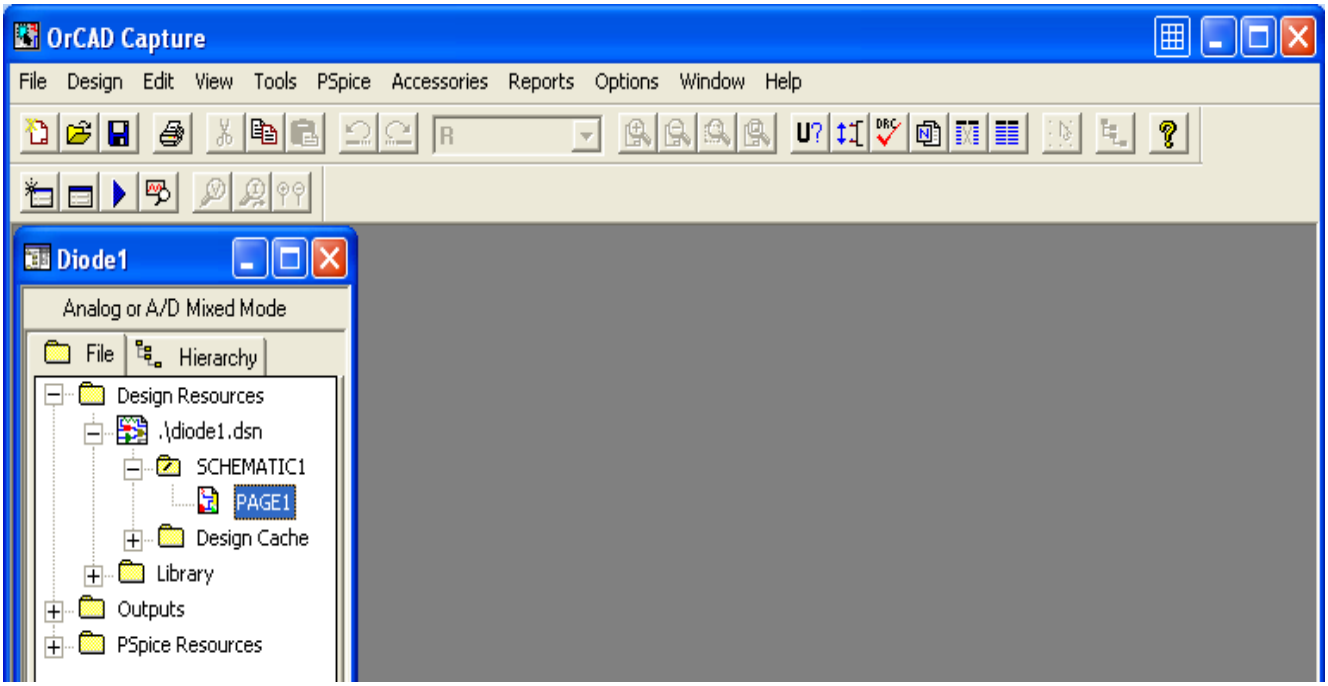


Рисунок 3.2 – Менеджер проекту

У режимі File розгортається плоска файлова структура проекту, в режимі Hierarchy - його ієрархічна структура. Файлова структура проекту містить в себе ряд розділів:

Design Resource - опис проекту (файл проекту * .dsn, окремі сторінки схеми, перелік компонентів Design Cache, VHDL-файли, перелік використовуваних

бібліотек компонентів * .olb);

Outputs - результати проектування;

PSpice Resource - інформація для моделювання (Include Files, Model Library, Simulation Profiles, Stimulus Files) і ін.

Подвійне клацання лівої кнопки миші по імені конкретного файлу або по його значку завантажує його у відповідний редактор (при виборі файлу схем завантажується редактор схем, при виборі текстового файлу - вбудований текстовий редактор).

На рис. 3.3 показано вікно редактора сторінки принципової схеми, на якій розташовані додаткові панелі інструментів.

Перелік використовуваних команд, відповідних піктограм панелі інструментів у режимі редагування схем, наведено в табл. 3.1.

Перелік команд, відповідних піктограм панелі інструментів у режимі моделювання, наведено в табл. 3.2.

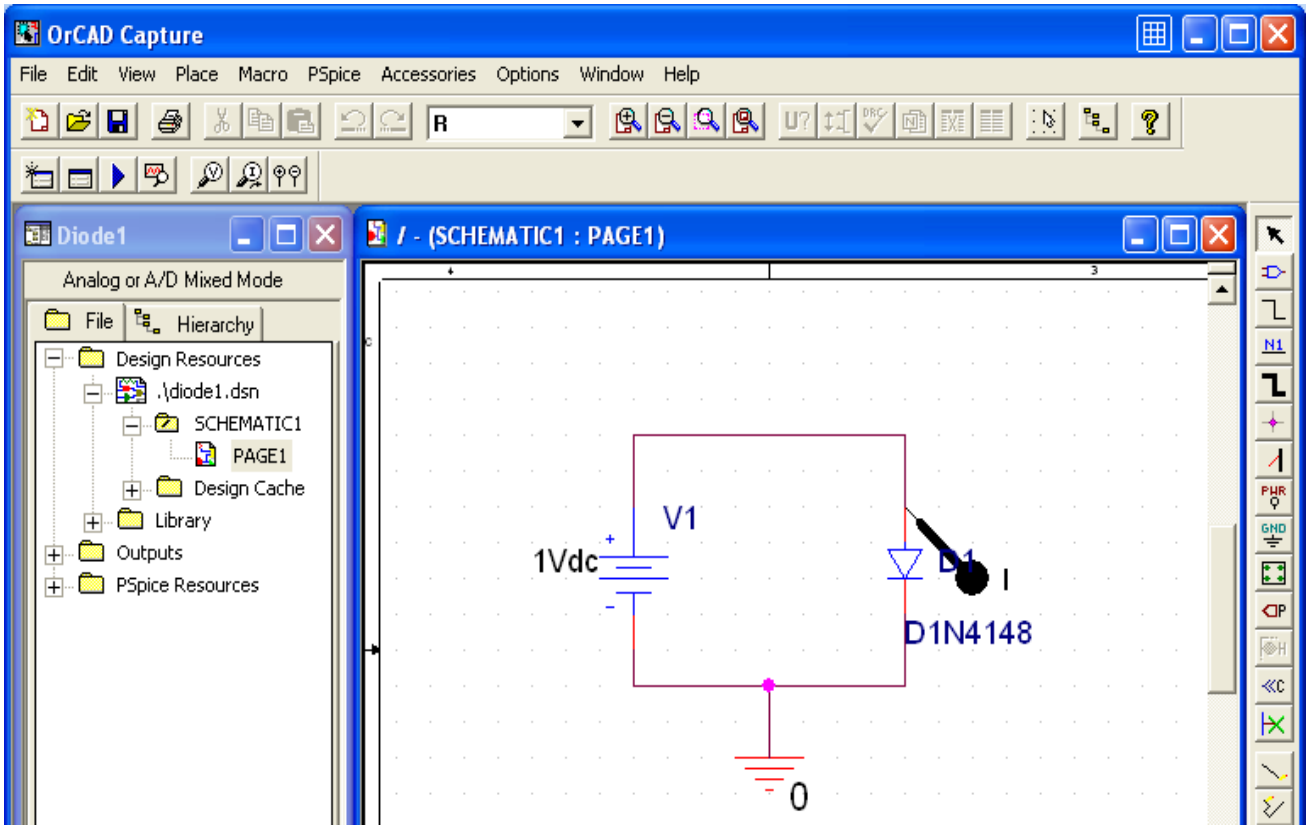


Рисунок 3.3 – Вікно редактора сторінки принципової схеми

Таблиця 3.1 – Піктограми панелі інструментів режиму редагування схем

піктограма	еквівалентна схема	опис команди
	Select	Режим вибору об'єктів
	Place Part	Вибір в бібліотеке компонента для розміщення його символу на схемі
	Place Wire	Малювання електричних ланцюгів. При натисканні кнопки Shift можливий ввід не ортогональних ланцюгів
	Place Ground	Размещеніесімволоввиводовісточніков харчування і «Землі»

Таблиця 3.2 – Піктограми панелі інструментів режиму моделювання

піктограма	еквівалентна схема	опис команди
	New Simulation Profile	Створення нового файлу завдання на моделювання
	Edit Simulation Setting	Редагування завдання на моделювання
	Run PSpice	Запуск програми PSpice на моделювання
	View Simulation Results	Просмотр графічних результатів моделювання
	Voltage / Level Marker	Установка маркера напруги / логічного рівня
	Current Marker	Установка маркера струму
	Voltage Differential Markers	Установка двох маркерів різниці напруг

Підключення бібліотеки з математичними моделями досліджуваних радиокомпонентов здійснюється в меню Simulation setting на вкладці Libraries. Натисканням на кнопку Browse вибирається файл бібліотеки Electronica.lib, що знаходиться в каталозі Libraries, який активацією клавіші Add to Design підключається до проекту.

У наступних параграфах викладаються загальні алгоритми виконання лабораторних досліджень напівпровідникових приладів за допомогою моделювання на ПЕОМ. Користувачі, що мають навички роботи в середовищі OrCAD, можуть виконувати ці завдання відповідно до самостійно розробленими методиками.

3.2 Дослідження на ПЕОМ випрямних діодів

3.2.1 Дослідження ВАХ і параметрів випрямного діода

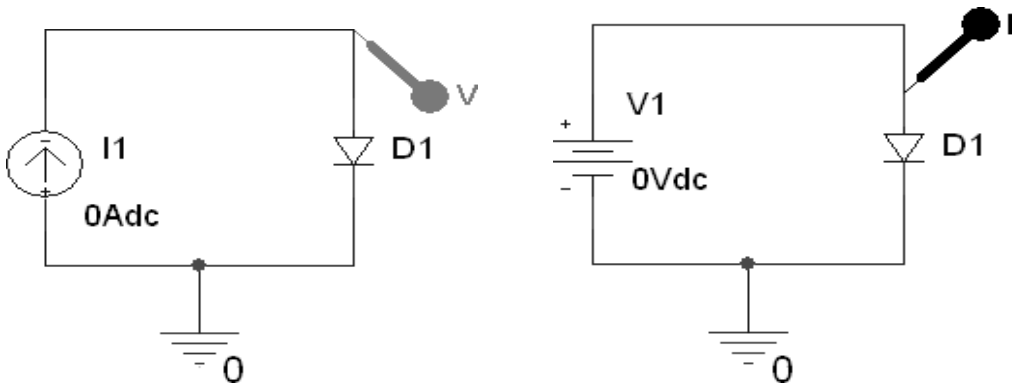
Для проведення дослідження ВАХ і параметрів випрямного діода необхідно запустити відповідний файл проекту:

а) *Diode*1-1.opj - при дослідженні математичної моделі кремнієвого діода КД521В (каталог Diode1-1, рис. 3.1);

б) *Diode*1-2.opj - при дослідженні математичної моделі германієвого діода ГД507А (каталог Diode1-2, рис. 3.1).

Дослідження ВАХ і параметрів випрямного діода проводиться відповідно до схеми вимірювань, наведеної на рис. 3.4.

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму DC Sweep.



а *б*

D1 - досліджуваний діод; I1 - джерело струму; V1 - джерело напруги[2].

Рисунок 3.4 – Схеми вимірювань для дослідження прямої (а) і зворотного (б) гілок ВАХ випрямного діода.

3.2.2 Методика дослідження прямої гілки ВАХ випрямного діода

Дослідження включає декілька етапів.

У меню Edit Simulation Setting. На вкладці Analysis у вікні Analysis type вибирається вид аналізу DC Sweep (багатоваріантний розрахунок режиму по постійному струму). Як варьируемой змінної (Sweep Variable) вказується джерело струму (Current source) I1 і задаються межі його перебудови відповідно до гранично допустимими параметрами діода.

В полі Start Value (рис. 3.5) встановлюються початкове значення I1, в поле End Value - кінцеве значення, в поле Increment - значення приросту I1; спосіб зміни (Sweep Type) - Linear (лінійний).

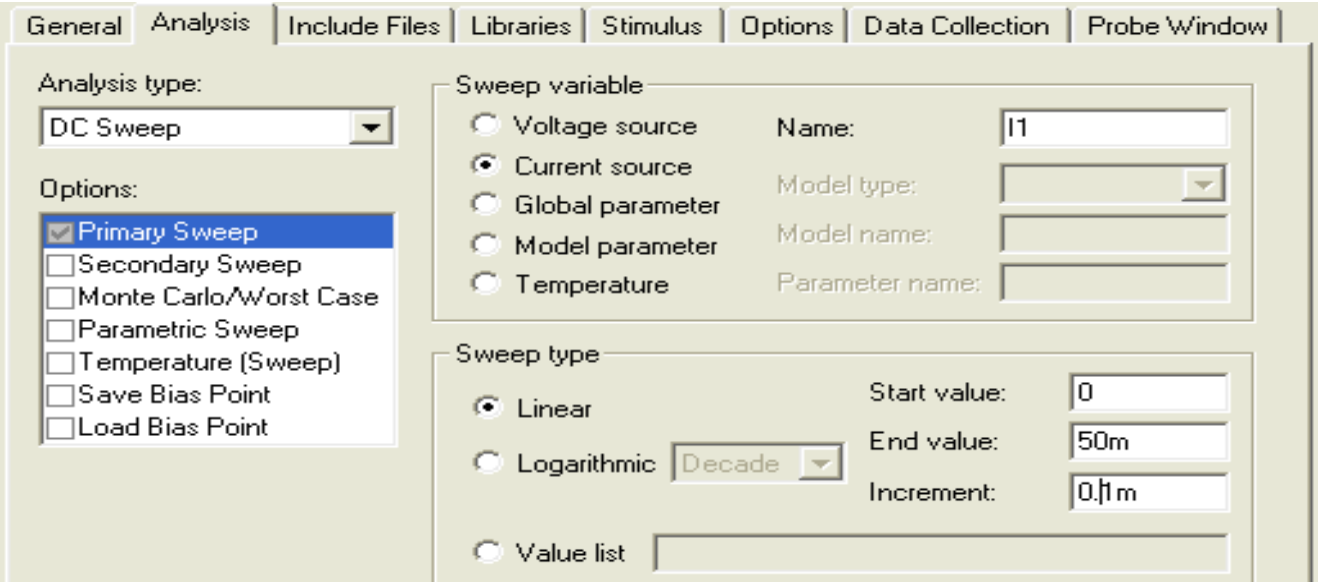


Рисунок 3.5 – Установка параметрів джерела струму I1

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture .

Результати моделювання наведені на рис. 3.6. Отриманий графік відповідає прямій гілці ВАХ випрямного діода типу 1N4148.

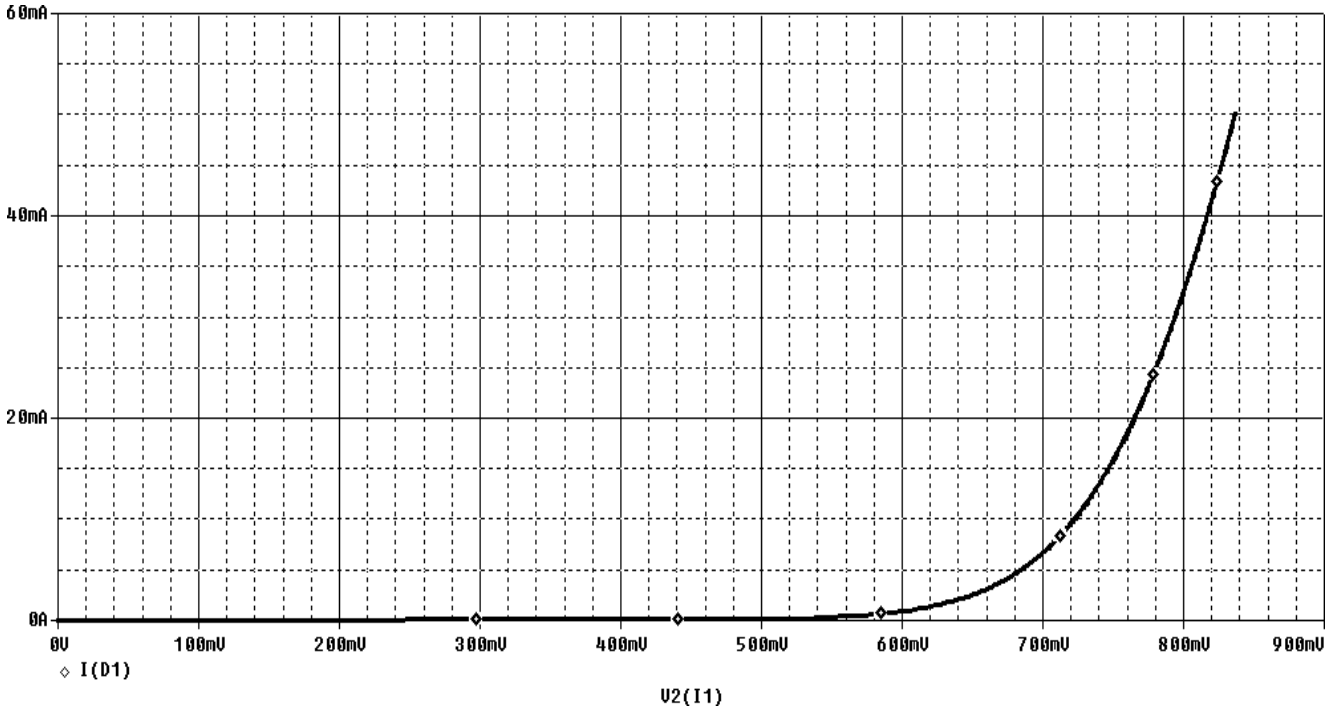


Рисунок 3.6 – Пряма гілка ВАХ діода

Для відображення результатів моделювання у вигляді залежності струму діода від напруги на діоді в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв PSpise A / D в якості аргументу по осі ох вказується напруга на діоді (меню Plot - Axis Setting - закладка X axis - клавіша Axis variable). В якості змінної по осі оу встановлюється струм діода (меню Trace - Add Trace).

3.2.3 Методика дослідження зворотної гілки ВАХ випрямного діода

У меню Edit Simulation Setting. На вкладці Analysis у вікні Analysis type вибирається вид аналізу DC Sweep (багатоваріантний розрахунок режиму по постійному струму). Як варьируемой змінної (Sweep Variable) вказується джерело напруги (Voltage source) V1 і задаються відповідні межі його перебудови. В поле Start Value (рис. 3.7) Встановлюється початкове значення V1, в поле End Value - кінцеве значення, V1, в поле Increment значення приросту; спосіб зміни (Sweep Type) – Linear (лінійний).

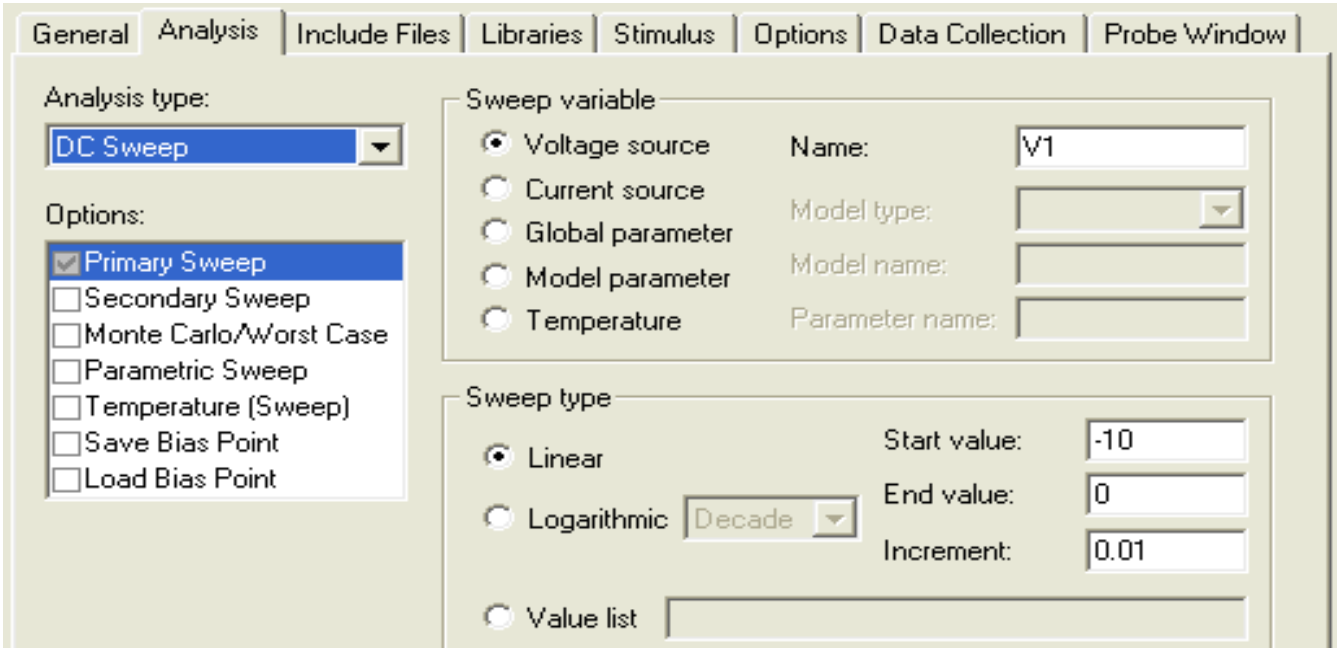


Рисунок 3.7 – Установка параметрів джерела напруги V1

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Результати моделювання наведені на рис. 3.8. Отриманий графік відповідає зворотної гілки ВАХ випрямного діода типу 1N4148.

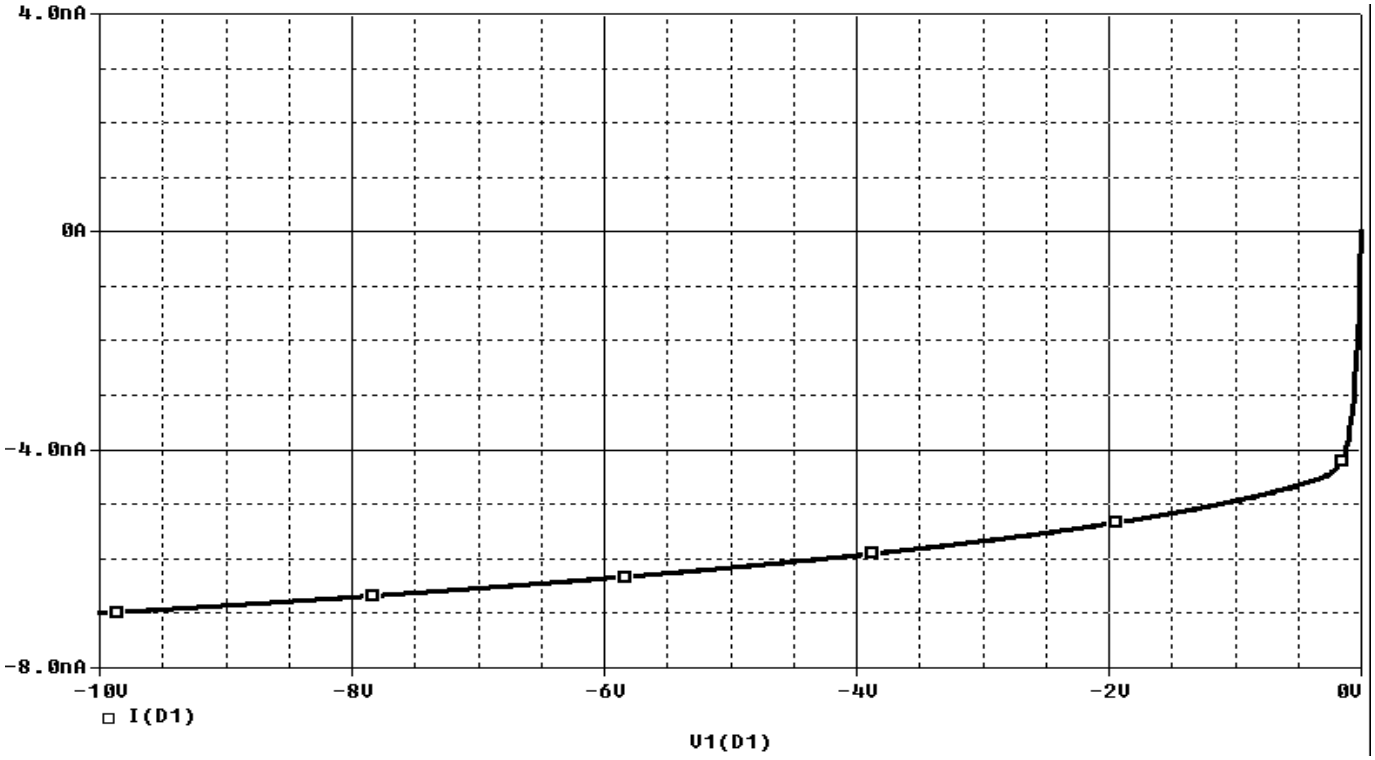
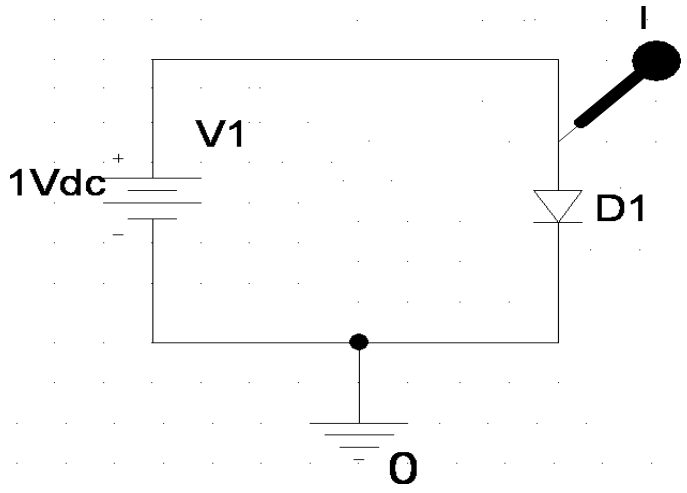


Рисунок 3.8 – Зворотня гілка ВАХ діода

3.2.4 Дослідження технологічного розкиду ВАХ і параметрів випрямних діодів

Дослідження технологічного розкиду ВАХ і параметрів випрямного діода проводиться на основі схеми вимірювань, наведеної на рис. 3.9.



D1 - досліджуваний діод; V1 - джерело напруги

Рисунок 3.9 – Схема вимірювань для дослідження технологічного розкиду ВАХ і параметрів випрямного діода:

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму DC Sweep і статистичного аналізу за методом Монте-Карло (Monte-Carlo). Параметром технологічного розкиду є об'ємний опір RS математичної моделі діода.

3.2.5 Методика дослідження технологічного розкиду ВАХ і параметрів випрямного диода

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

На Рисуноку 3.10 приведена пряма гілка ВАХ випрямного діода 1N4148 з урахуванням технологічного розкиду.

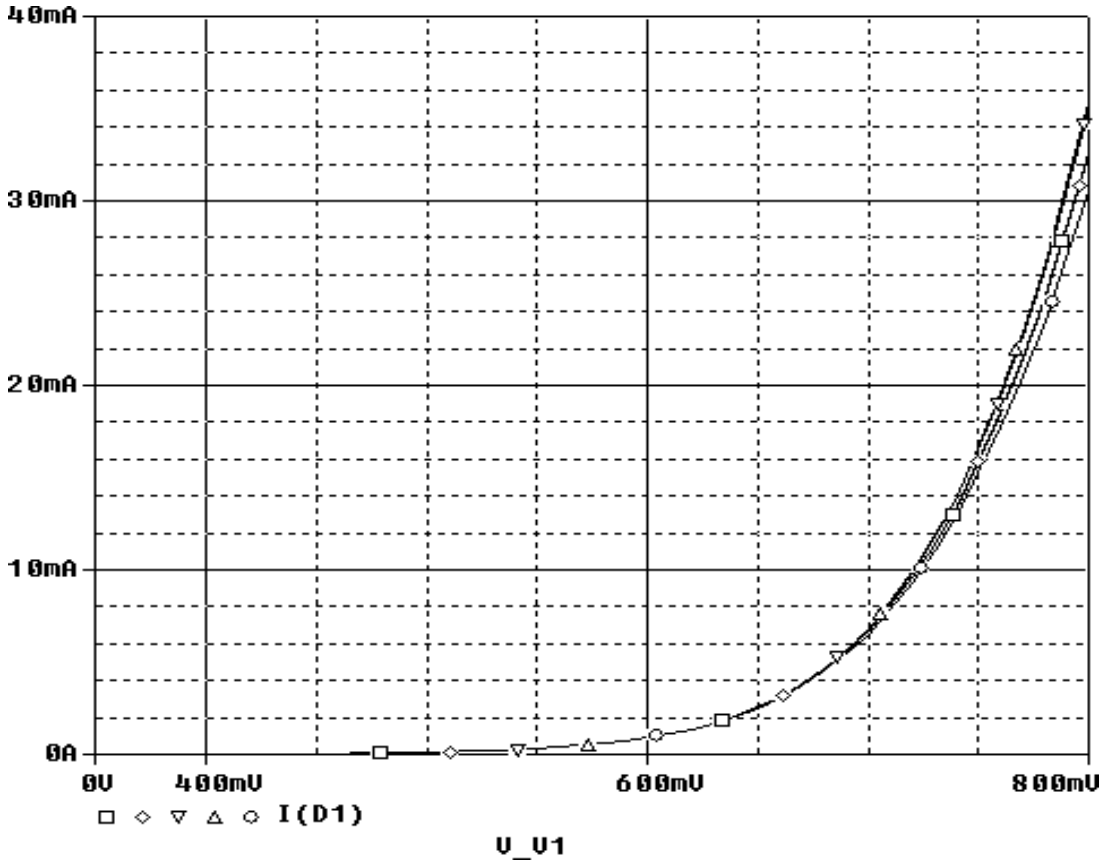


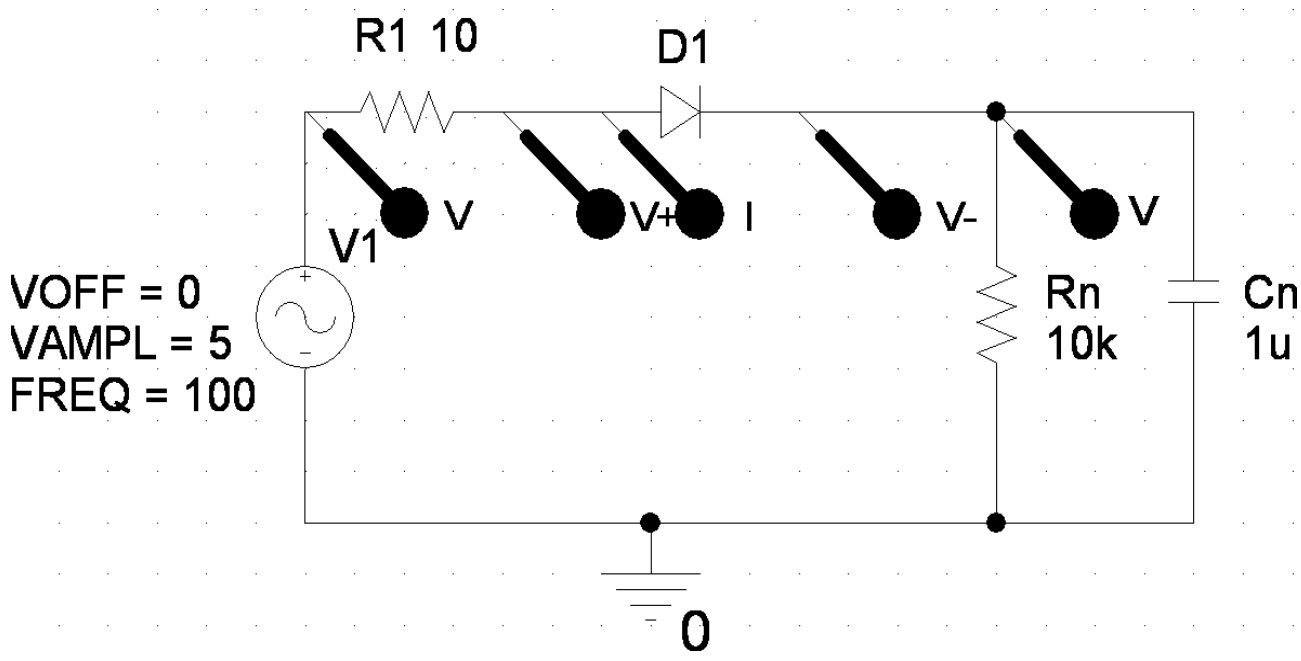
Рисунок 3.10 – Пряма гілка ВАХ випрямного діода з урахуванням технологічного розкиду

Для зміни масштабу відображення в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв OrCAD PSpice A / D необхідно встановити необхідні значення напруги по осі ox в меню Plot - Axis Setting - X axis.

3.2.6 Методика дослідження роботи випрямного діода в схемі однополупериодного випрямляча.

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Для дослідження роботи випрямляча на активно-ємнісне навантаження необхідно включити в схему конденсатор Cn, викликавши його з бібліотеки Analog.OLB і помістивши на робоче поле схемотехнического редактора Capture. В результаті схема повинна прийняти вигляд згідно рис. 3.11.

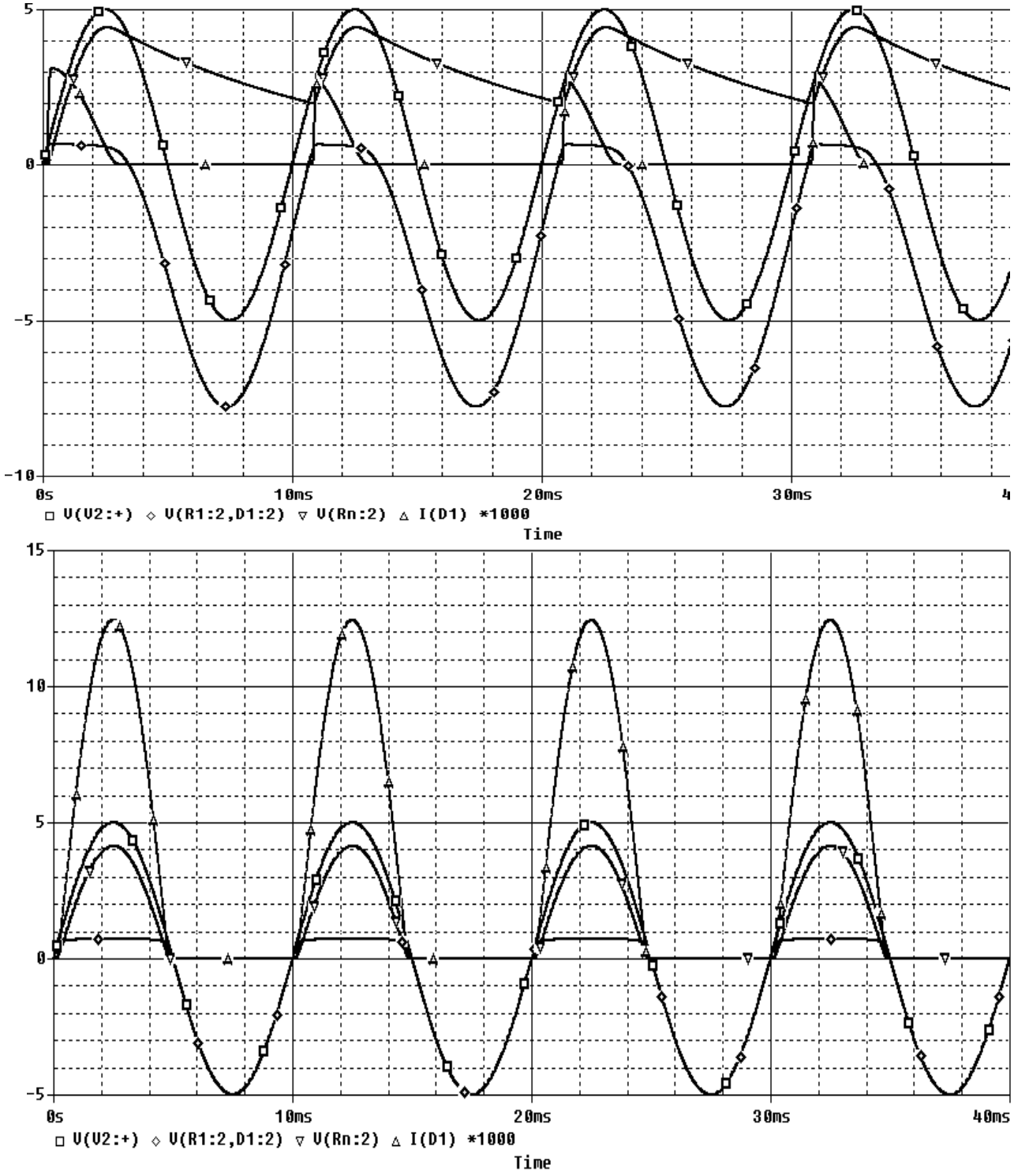


D1 - досліджуваний діод; V1 - джерело напруги;

R1 - внутрішній опір джерела V1; Rn, Cn - опір і ємність навантаження

Рисунок 3.11 – Схема вимірювань для дослідження роботи випрямного діода на змінному струмі на активно-ємнісне навантаження

На рис. 3.12 наведені результати моделювання. Вони представляють осцилограми напруг і струмів в контрольних точках досліджуваної схеми однополуперіодного випрямляча на напівпровідниковому діоді.



б

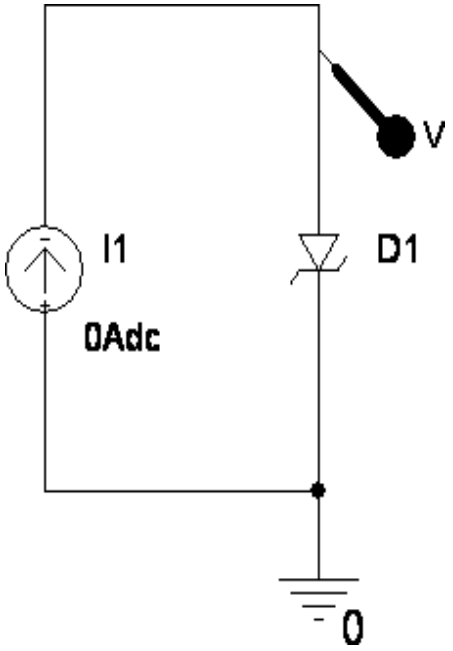
б- робота на активне навантаження; а - робота на активно-ємнісне навантаження

Рисунок 3.12 – Осцилограми напруг і струмівя в точках схеми однополуперіодного випрямляча:

3.3 Дослідження на ПЕОМ стабилитронів

3.3.1 Дослідження ВАХ і параметрів стабілітрона

Дослідження ВАХ і параметрів стабілітрона проводиться на основі схеми вимірювань, наведеної на рис. 3.13.



D1 - досліджуваний стабілітрон

Рисунок 3.13 – Схема вимірювань, яка використовується для дослідження ВАХ і параметрів стабілітрона

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму DC Sweep.

3.3.2 Методика дослідження прямої і зворотної гілог ВАХ стабілітрона

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів

схемотехнического редактора Capture.

На рис. 3.14 результати моделювання представлені у вигляді графіка ВАХ стабілітрона типу 1N4732

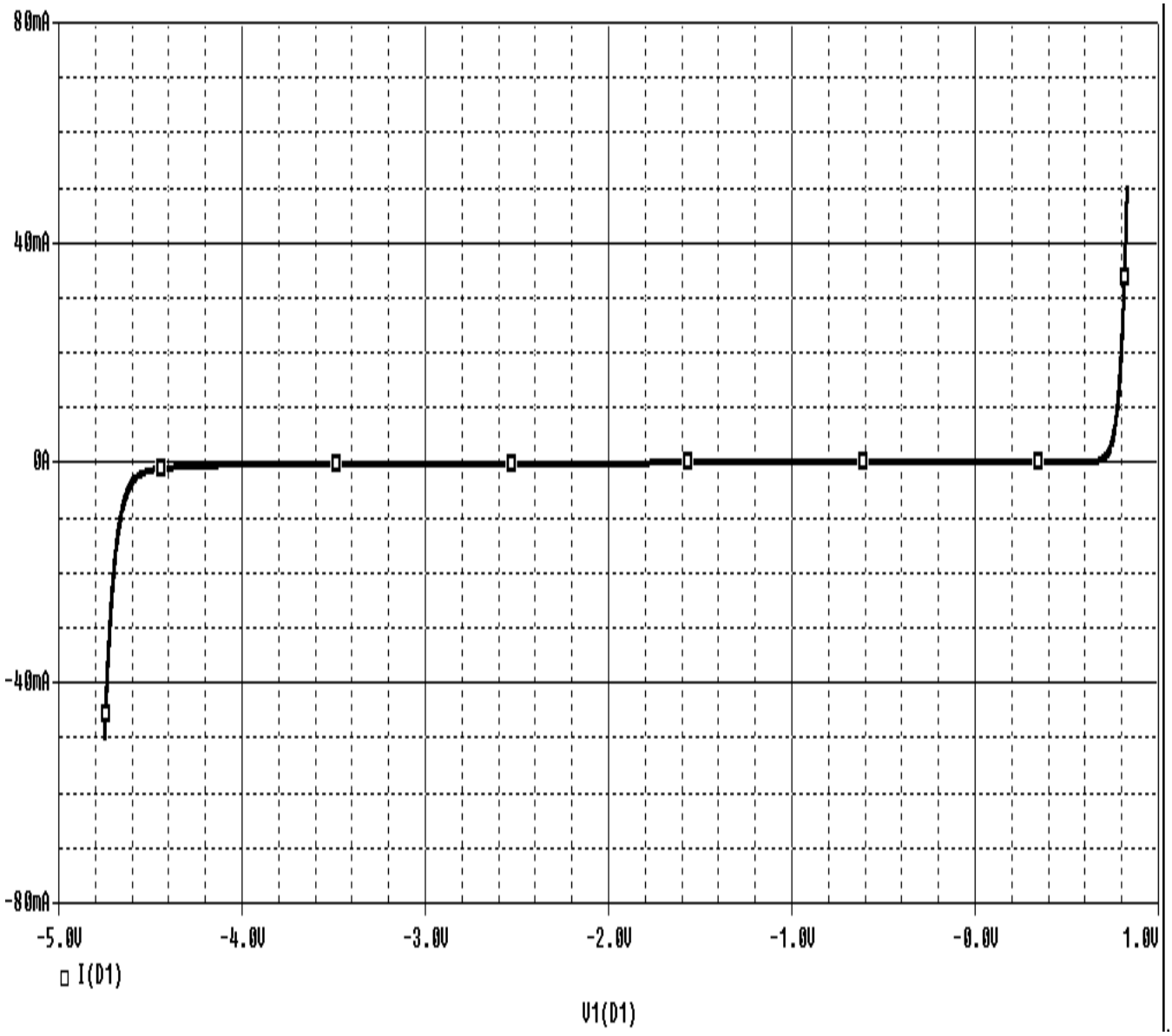
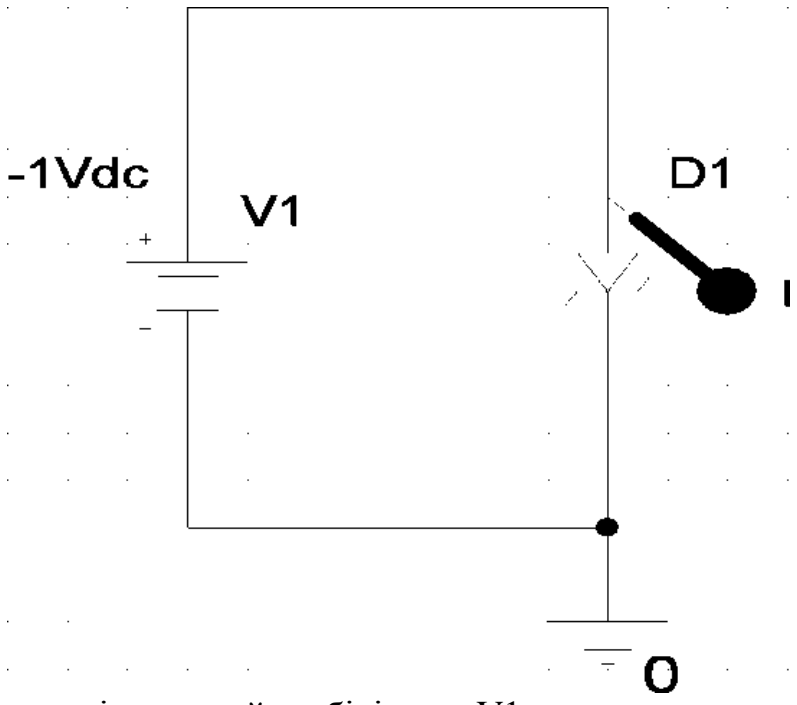


Рисунок 3.14 – ВАХ стабілітрона 1N4732

3.3.3 Дослідження технологічного розкладу ВАХ і параметрів стабілітрона

Дослідження проводиться на основі схеми вимірювань, наведеної на рис. 3.15



D1 - досліджуваний стабілітрон; V1 - джерело напруги

Рисунок 3.15 – Схема вимірювань для дослідження технологічного розкиду ВАХ і параметрів стабілітрона:

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Результати моделювання показані на рис. 3.16. Вони представляють графіки зворотної гілки ВАХ п'яти стабилитронов одного типу, що відрізняються значеннями зворотної напруги пробою.

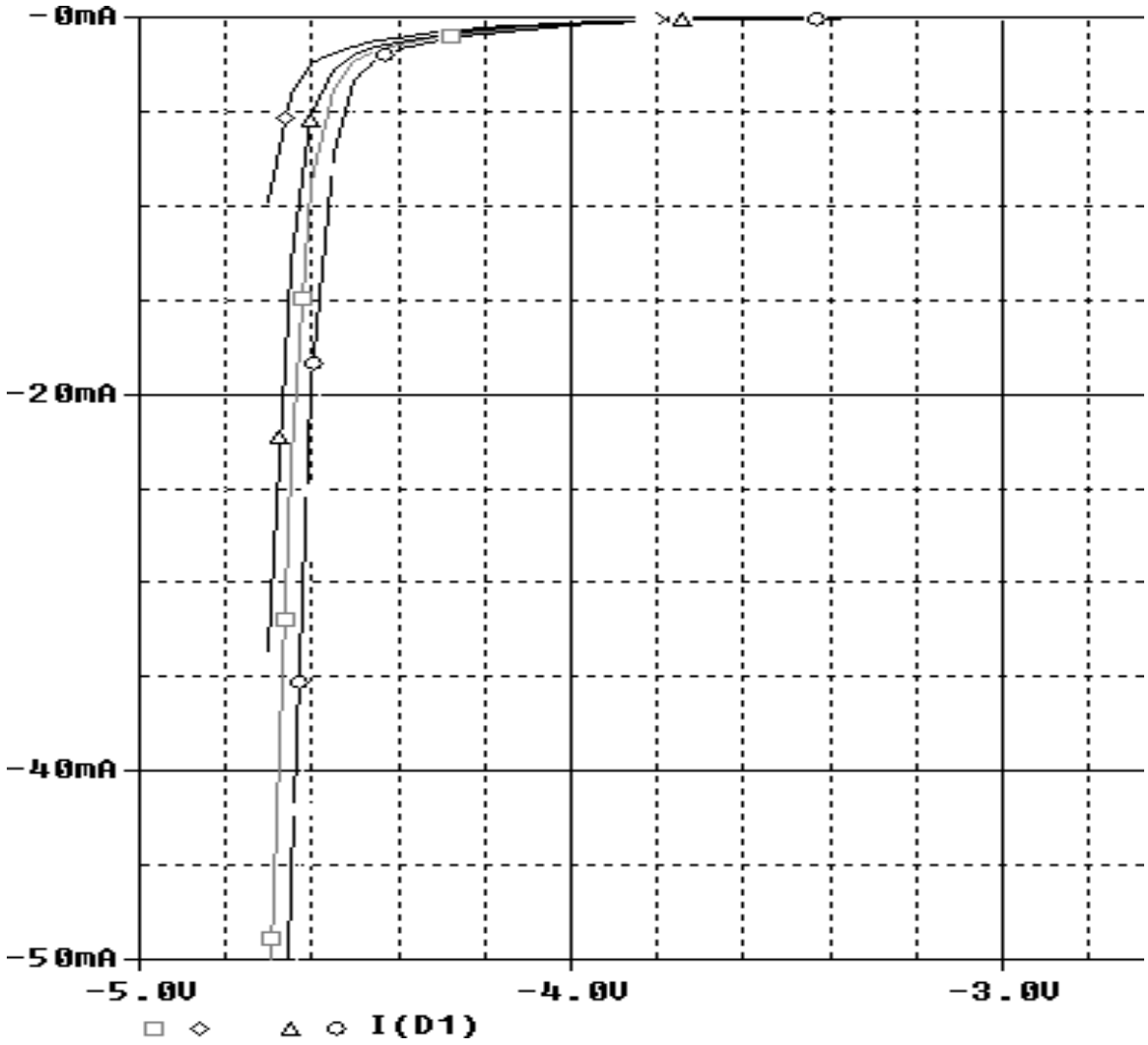


Рисунок 3.16 – ВАХ стабілітрона 1N4732 з урахуванням технологічного розкиду

3.3.4 Дослідження роботи стабилитрона на змінному струмі

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

На рис. 3.17 показані результати моделювання, які представляють осцилограми напруг в контрольних точках досліджуваної схеми стабілізатора напруги на основі стабілітрона.

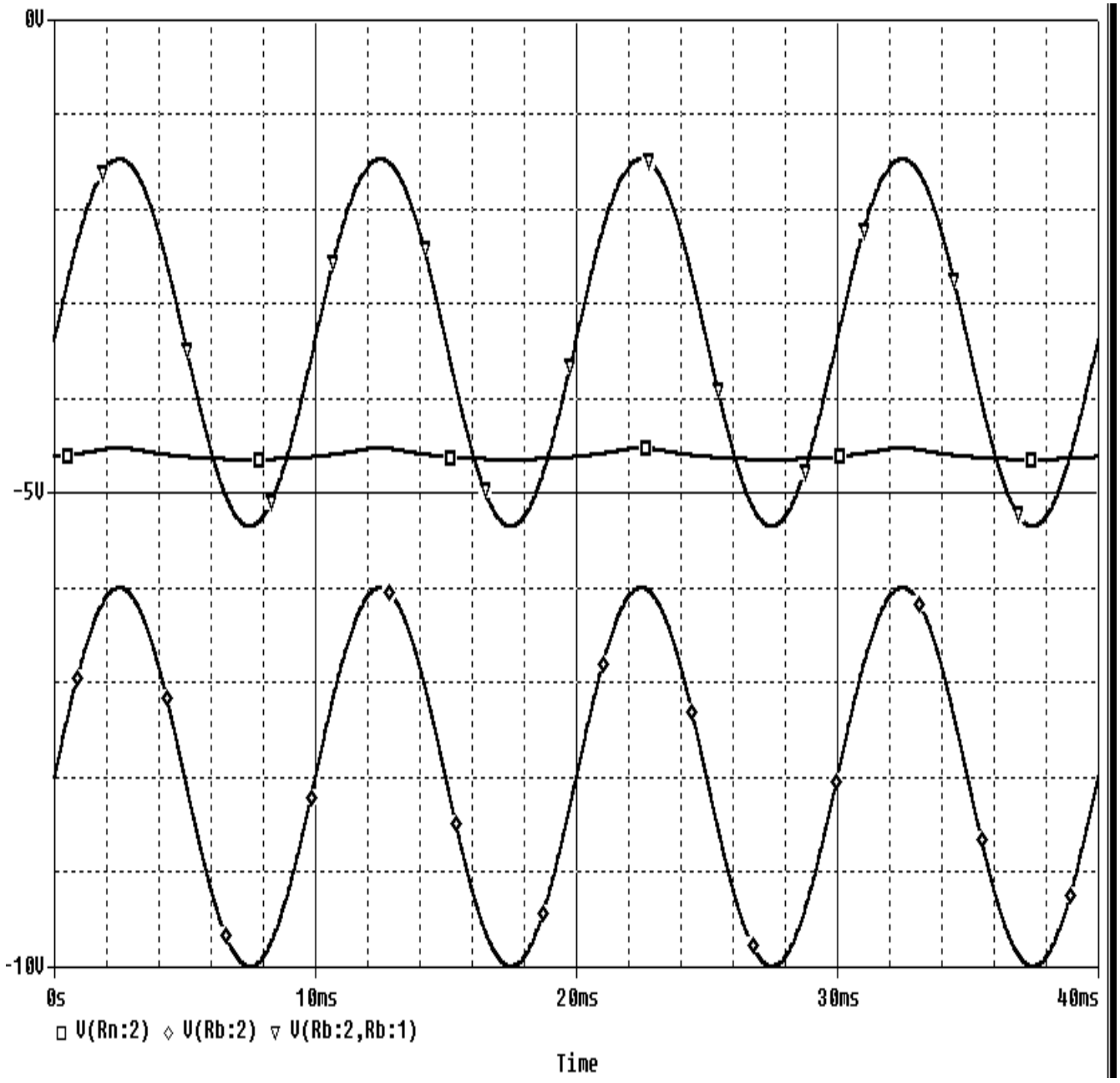
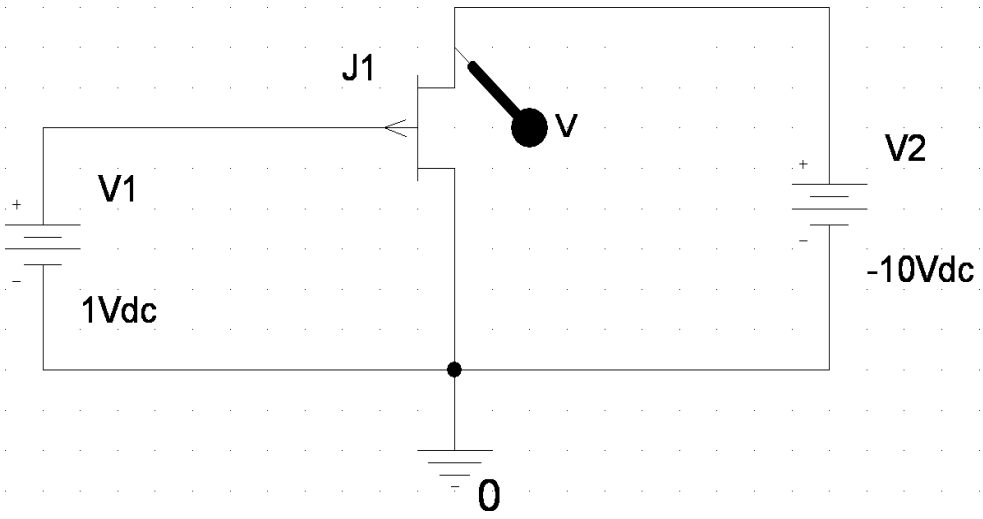


Рисунок 3.17 – Осцилограми напруг в точках досліджуваної схеми стабілізатора напруги

3.4 Дослідження на ПЕОМ польових транзисторів

3.4.1 Дослідження ВАХ і параметрів польового транзистора

Дослідження ВАХ і параметрів польових транзисторів проводиться відповідно до схеми вимірювань, наведеної на рис. 3.18.



J1 - досліджуваний польовий транзистор; V1 - джерело напруги в ланцюзі затвора;

V2 - джерело напруги в ланцюзі стоку

Рисунок 3.18. Схема вимірювань для дослідження ВАХ ПТ:

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму (DC Sweep).

3.4.2 Методика дослідження статичних передавальних ВАХ польового транзистора

Результати моделювання наведені на рис. 3.19 і представляють сімейство статичних передавальних ВАХ транзистора типу 2N3331 з керуючим переходом і

каналом p-типу.

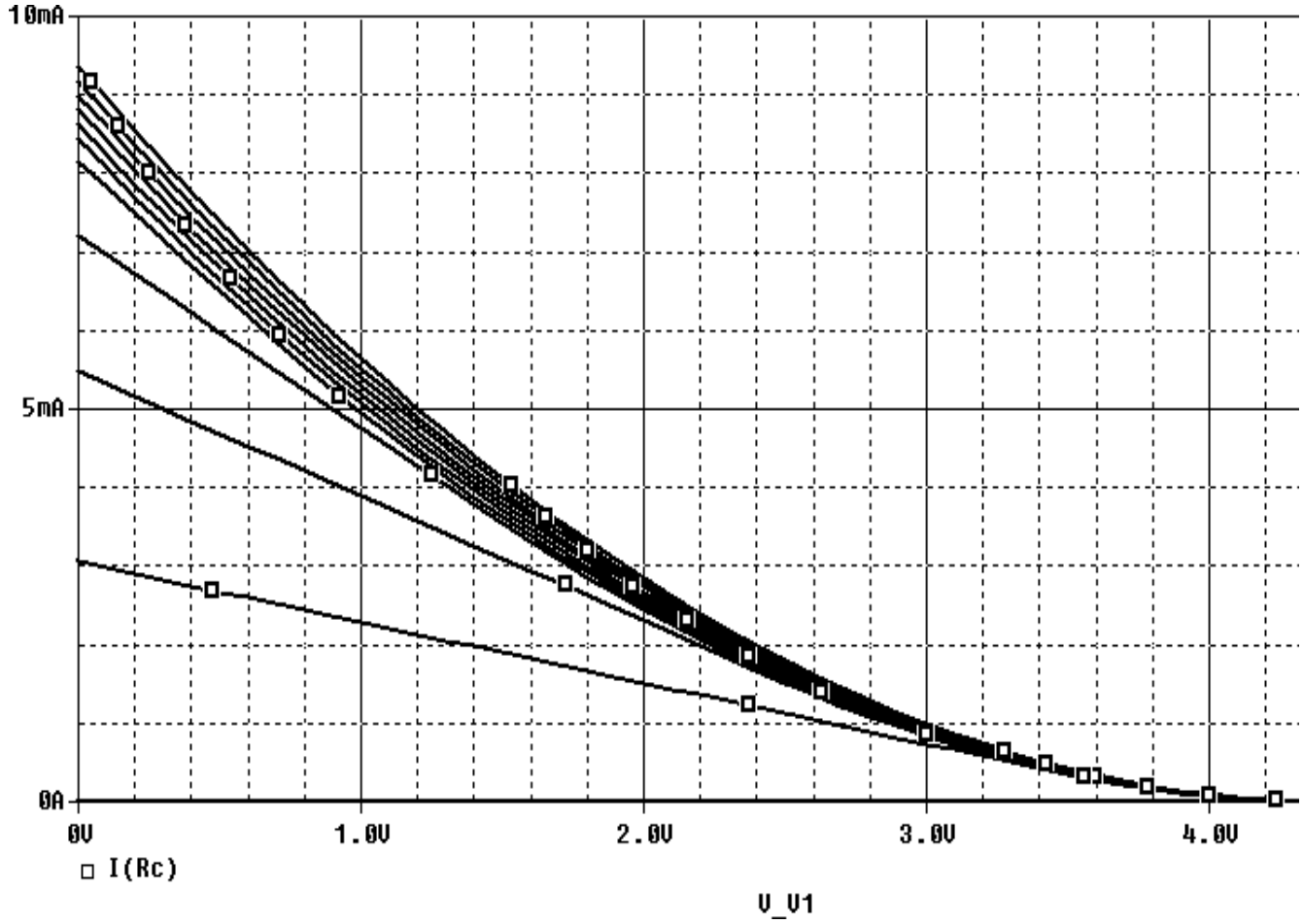


Рисунок 3.19 – Сімейство статичних передавальних ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом p-типу

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

3.4.3 Методика дослідження статичних вихідних ВАХ польового транзистора

Результати моделювання наведені на рис. 3.20. Вони представляють сімейство статичних вихідних ВАХ транзистора типу 2N3331 з керуючим переходом і каналом р-типу.

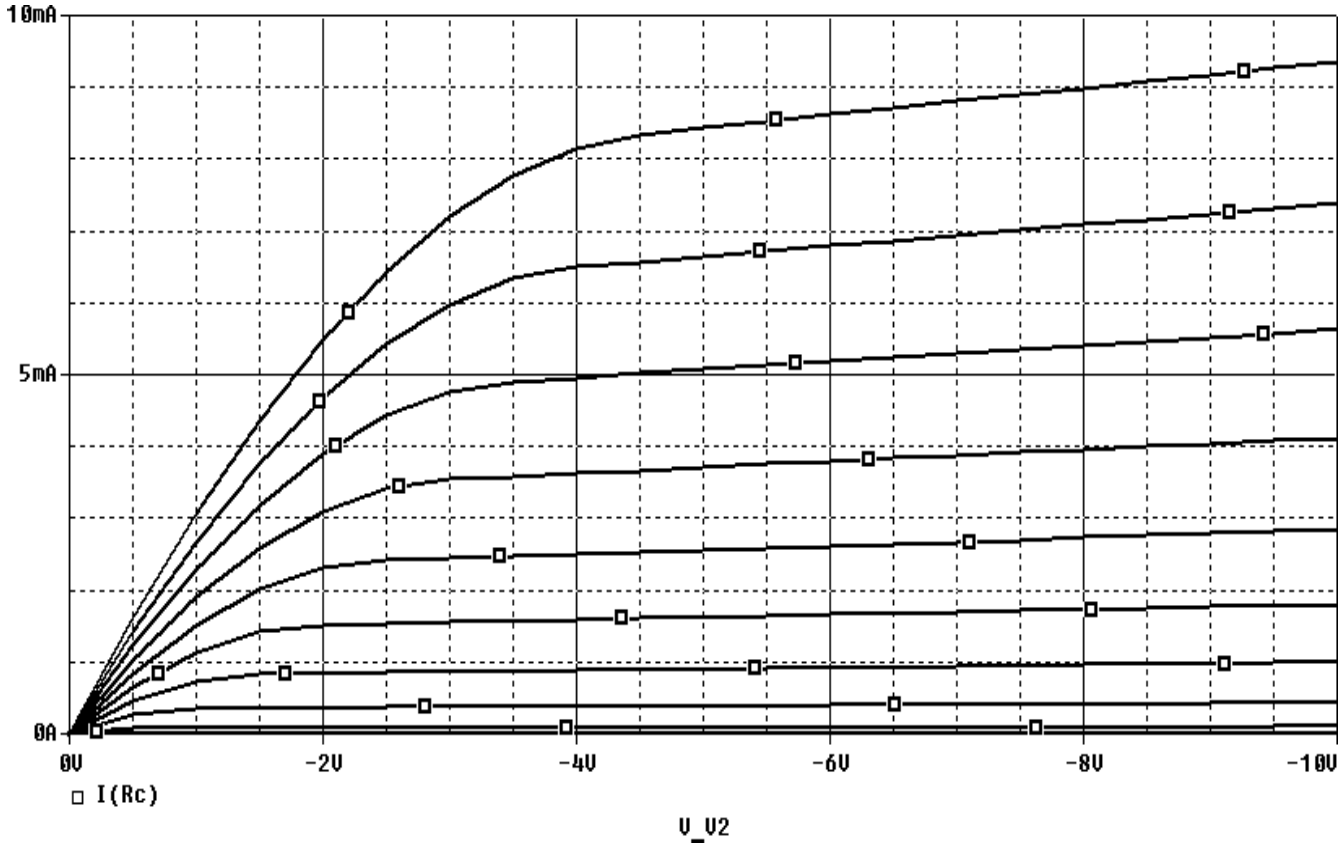
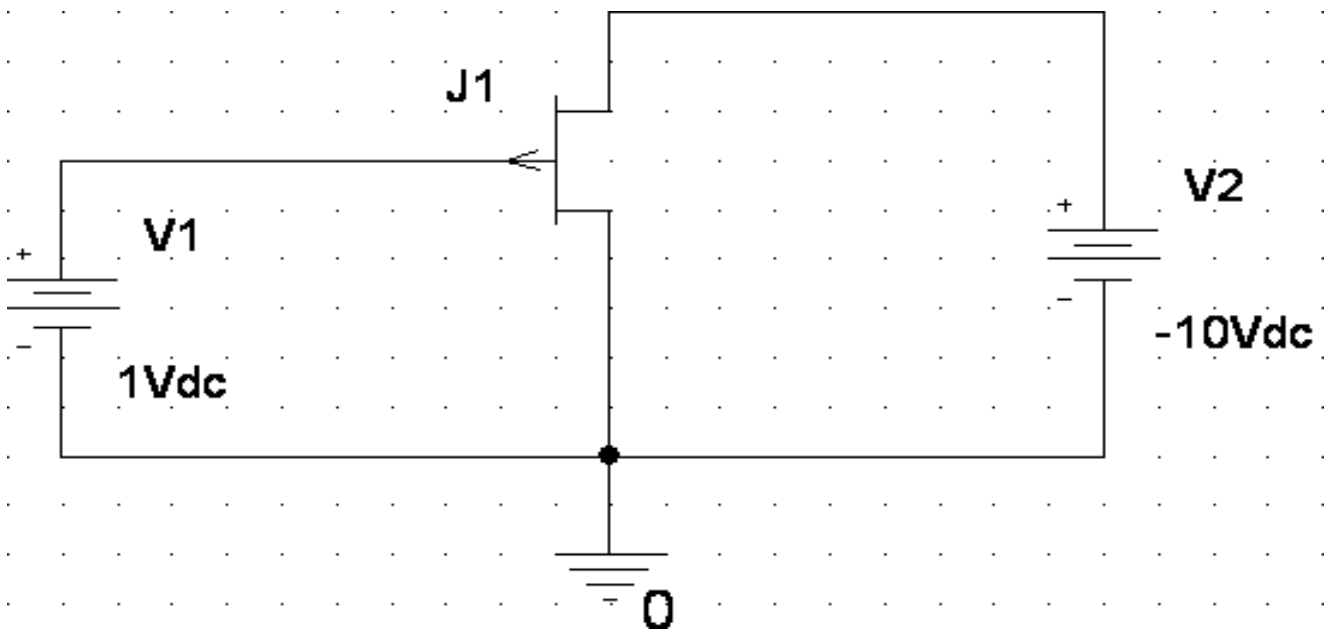


Рисунок 3.20 – Сімейство статичних вихідних ВАХ польового транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом р-типу

3.4.4 Дослідження технологічногорозкиду ВАХ і параметрів польових транзисторів

Дослідження технологічного розкиду ВАХ і параметрів польових транзисторів проводиться відповідно до схеми вимірювань, представленої на рис. 3.21.

Параметром математичної моделі польового транзистора, схильним до технологічного розкиду, є коефіцієнт пропорційності BETA, відповідний крутизні транзистора .



J1 -полевой транзистор з керуючим переходом;

V1 - джерело напруги в ланцюзі затвора; V2 - джерело напруги в ланцюзі стоку

Рисунок 3.21 – Схема вимірювань для дослідження технологічного розкиду ВАХ польового транзистора

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму (DC Sweep) і статистичного аналізу за методом Монте-Карло (Monte-Carlo).

3.4.5 Методика дослідження технологічного розкиду статичних передавальних ВАХ польового транзистора

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Результати моделювання наведені на рис. 3.22 і представляють графіки статичних передавальних ВАХ п'яти польових транзисторів одного типу з урахуванням технологічного розкиду їх параметрів.

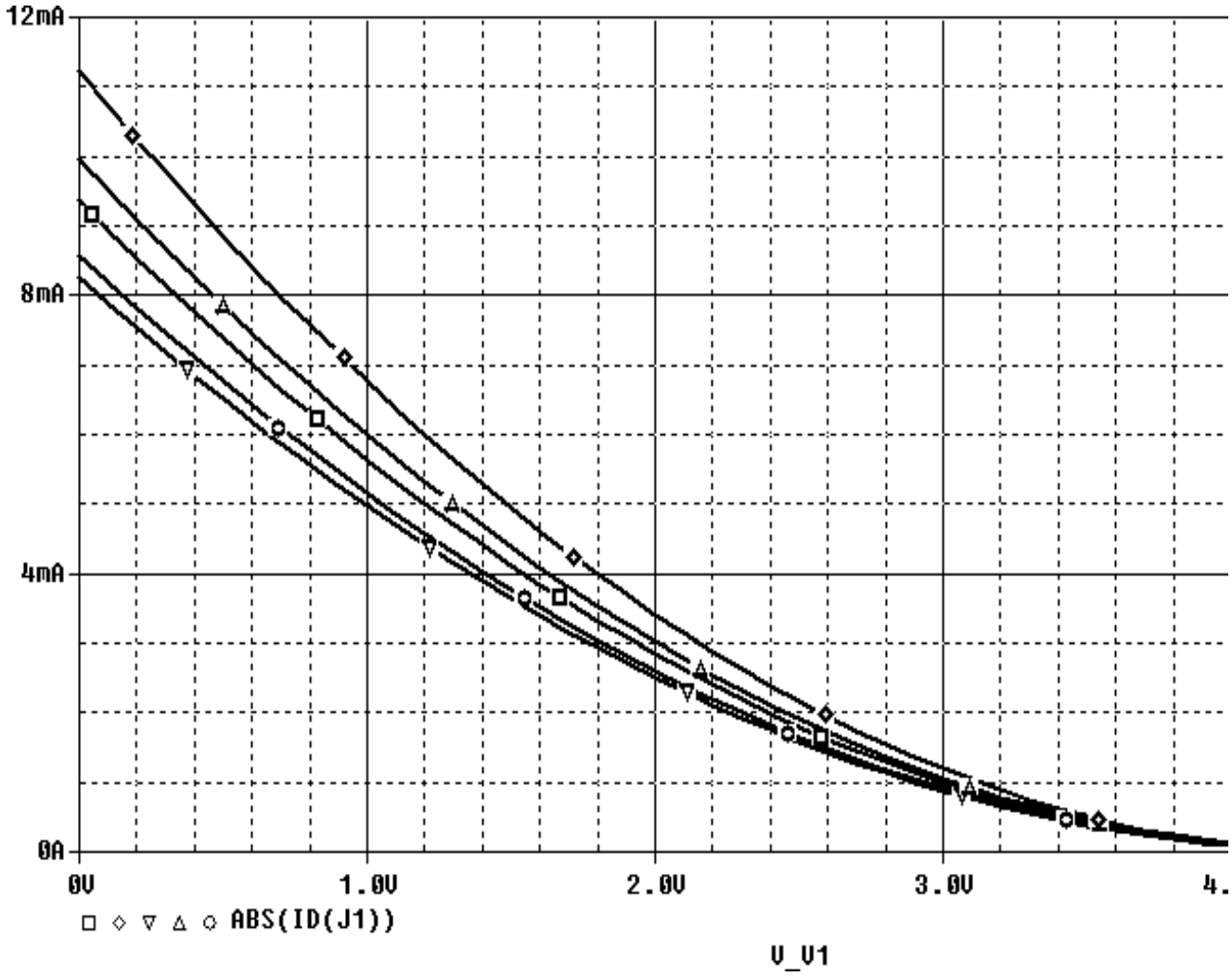


Рисунок 3.22 – Статичні передавальні ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом р-типу з урахуванням технологічного розкиду при V1 = -10 В

3.4.6 Методика дослідження технологічного розкиду статичних віхідних ВАХ польового транзистора

Активізується процес моделювання за допомогою вибору меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Результати моделювання показані на рис. 3.23. Результати представляють собою графіки статичних вихідних ВАХ п'яти польових транзисторів одного типу з урахуванням технологічного розкиду параметрів.

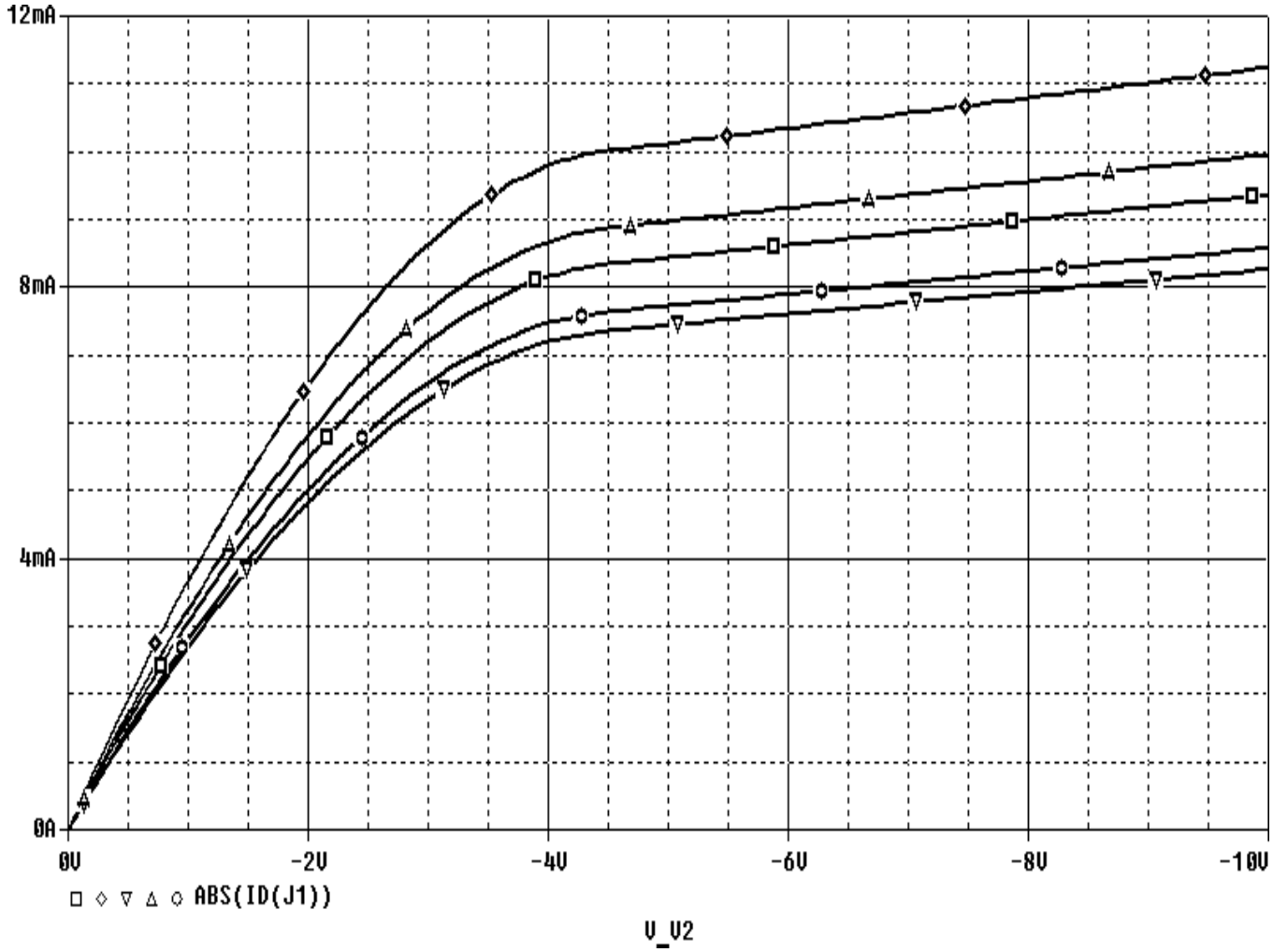


Рисунок 3.23 – Статичні вихідні ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом р-типу з урахуванням технологічного розкиду при V1 = 0 В

3.4.6 Методика дослідження температурної залежності статичних передавальних ВАХ польового транзистора.

Активізується меню Temperature (Sweep) (рис. 3.24). В поле Repeat the simulation for each of the temperatures через пробіл зазначаються температури, для

яких необхідно провести аналіз.

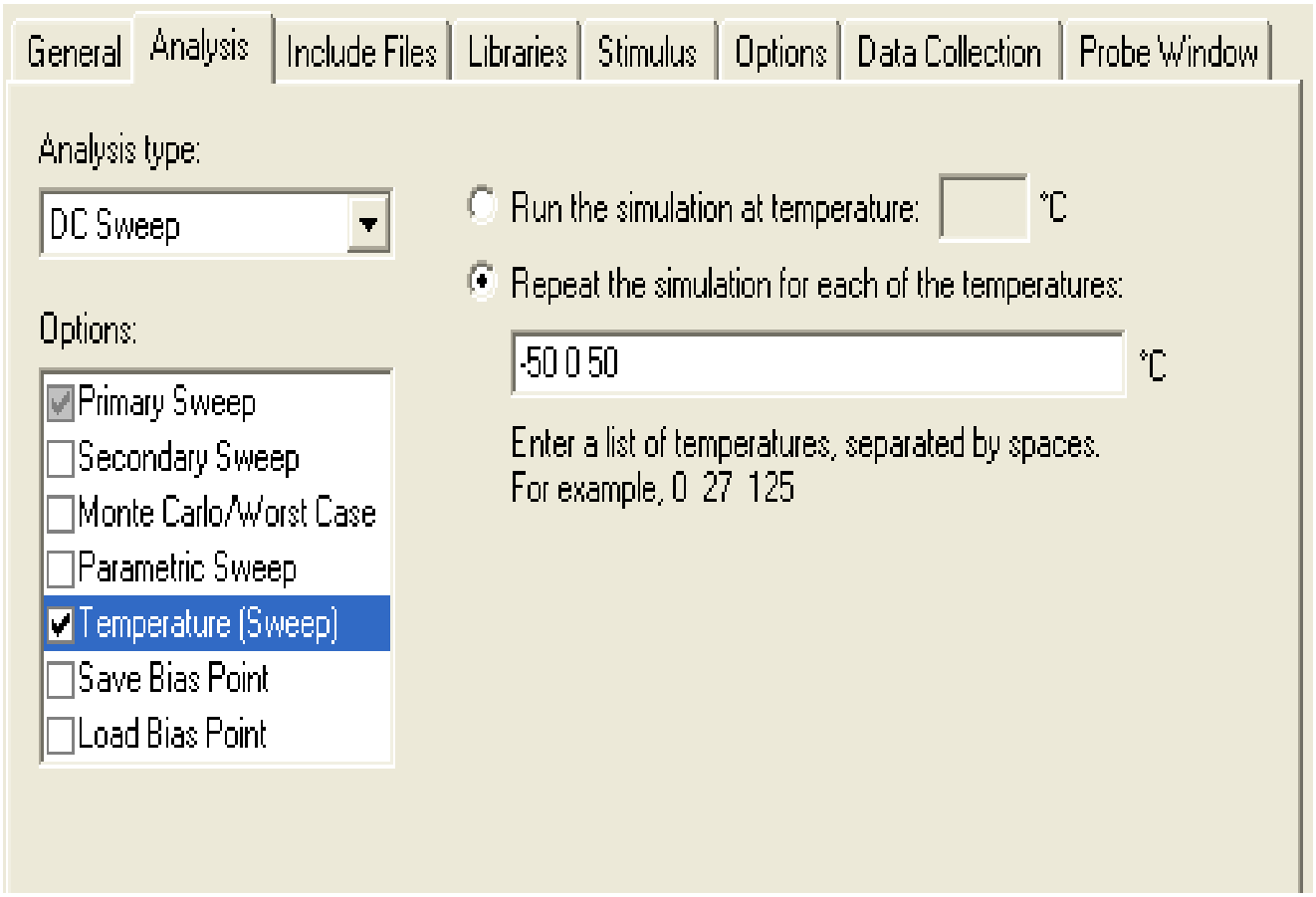


Рисунок 3.24 – Установка температур аналізу

Результати моделювання показані на рис. 3.25. Результати представляють сімейство статичних передавальних ВАХ транзистора типу 2N3331 для трьох значень температури.

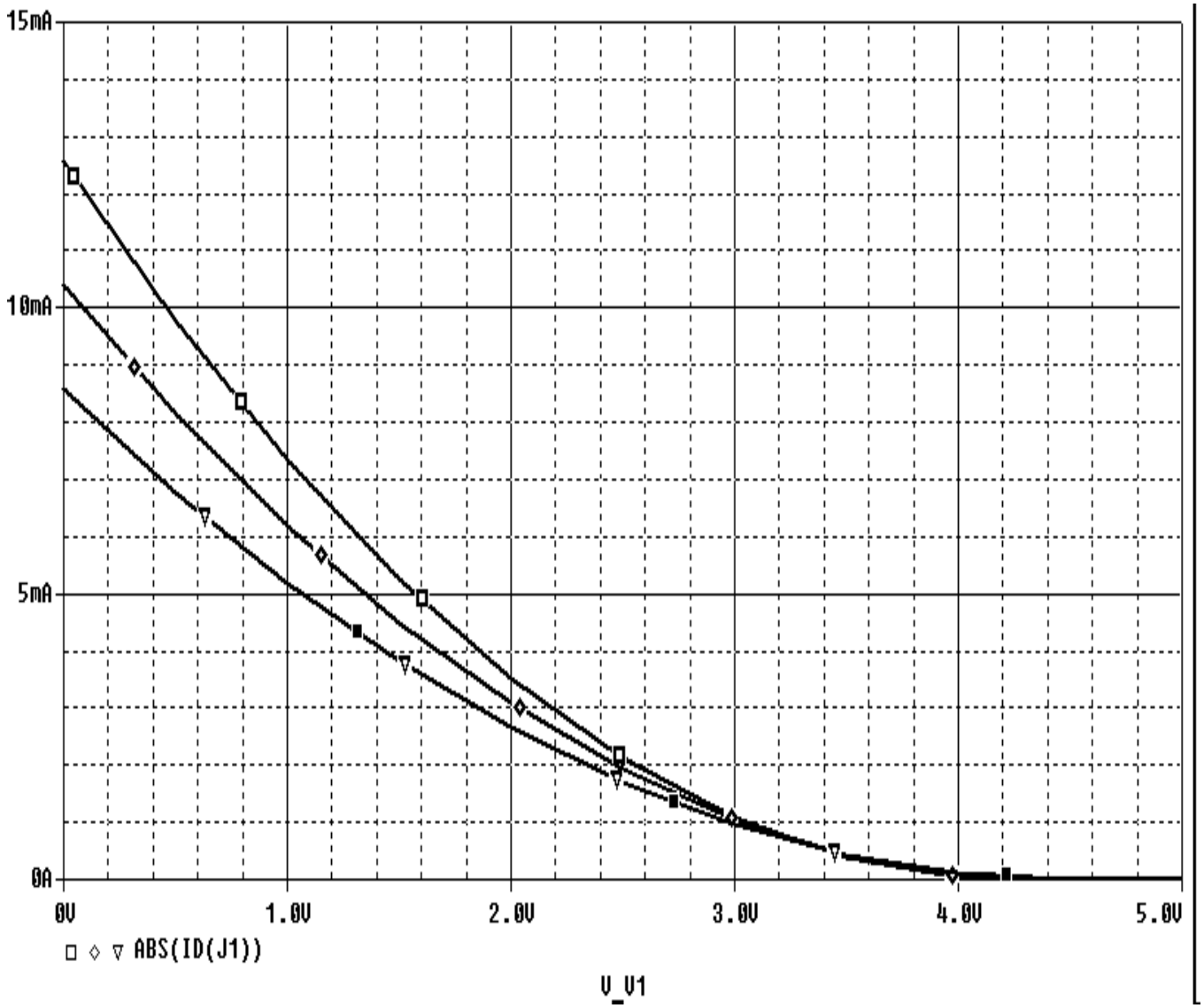


Рисунок 3.25 – Сімейство статичних передавальних ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом р-типу при різних температурах

3.4.7 Методика дослідження температурної залежності статичних вихідних ВАХ польового транзистора

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Результати моделювання наведені на рис. 3.26 і представляють сімейство статичних вихідних ВАХ транзистора типу 2N3331 для трьох значень температури.

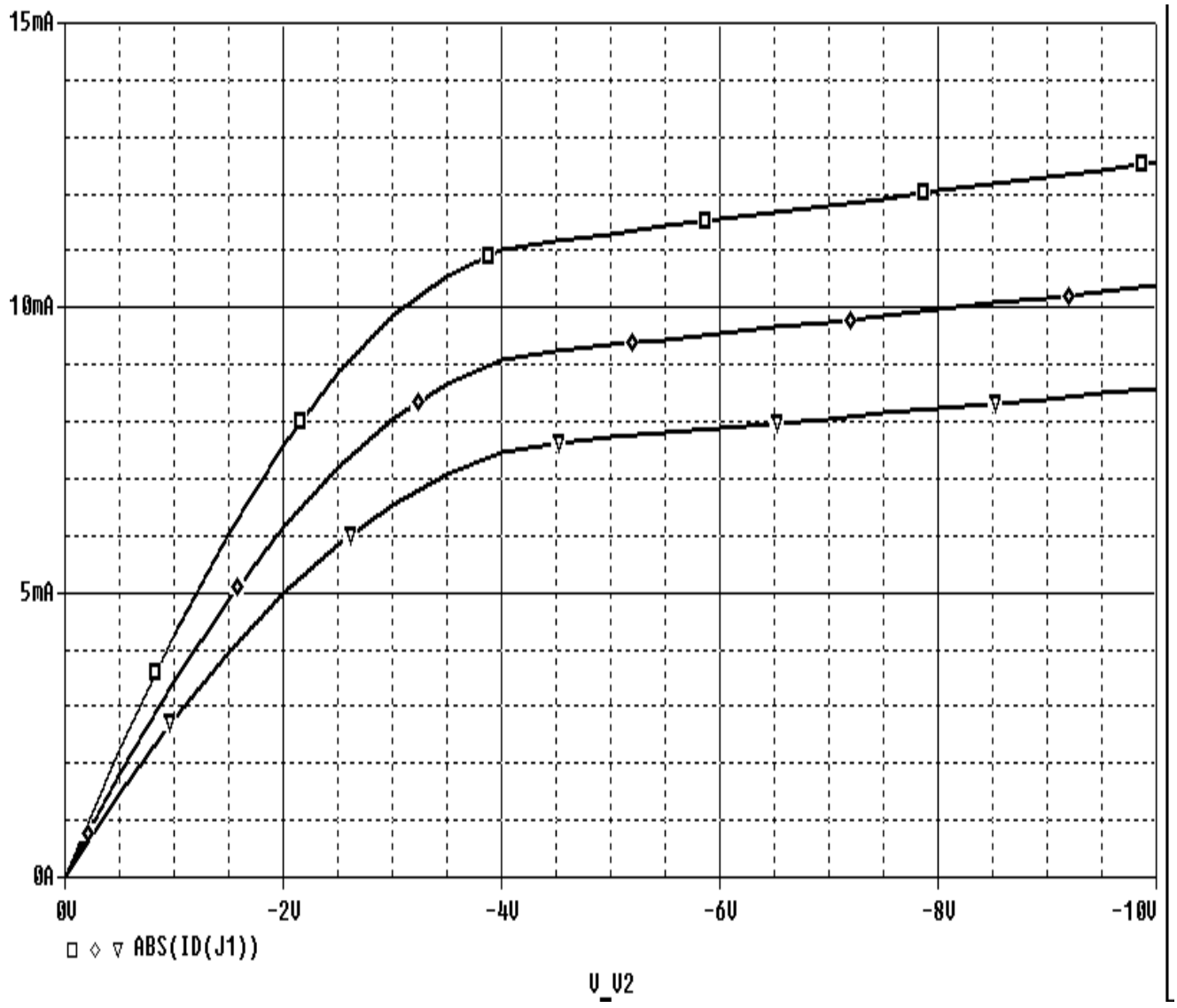


Рисунок 3.26 – Сімейство статичних вихідних ВАХ транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом р-типу при різних температурах

3.4.8 Методика дослідження температурної крутизни польового транзистора

Дослідження температурної залежності крутизни польового транзистора здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму (DC Sweep) при заданих значеннях джерел напруги V1 і V2.

Для відображення результатів моделювання у вигляді залежності крутизни польового транзистора від температури в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв PSpise A / D в якості опції по осі оу вказується відношення струму стоку до напруги затвор-витік (меню Trace - Add Trace).

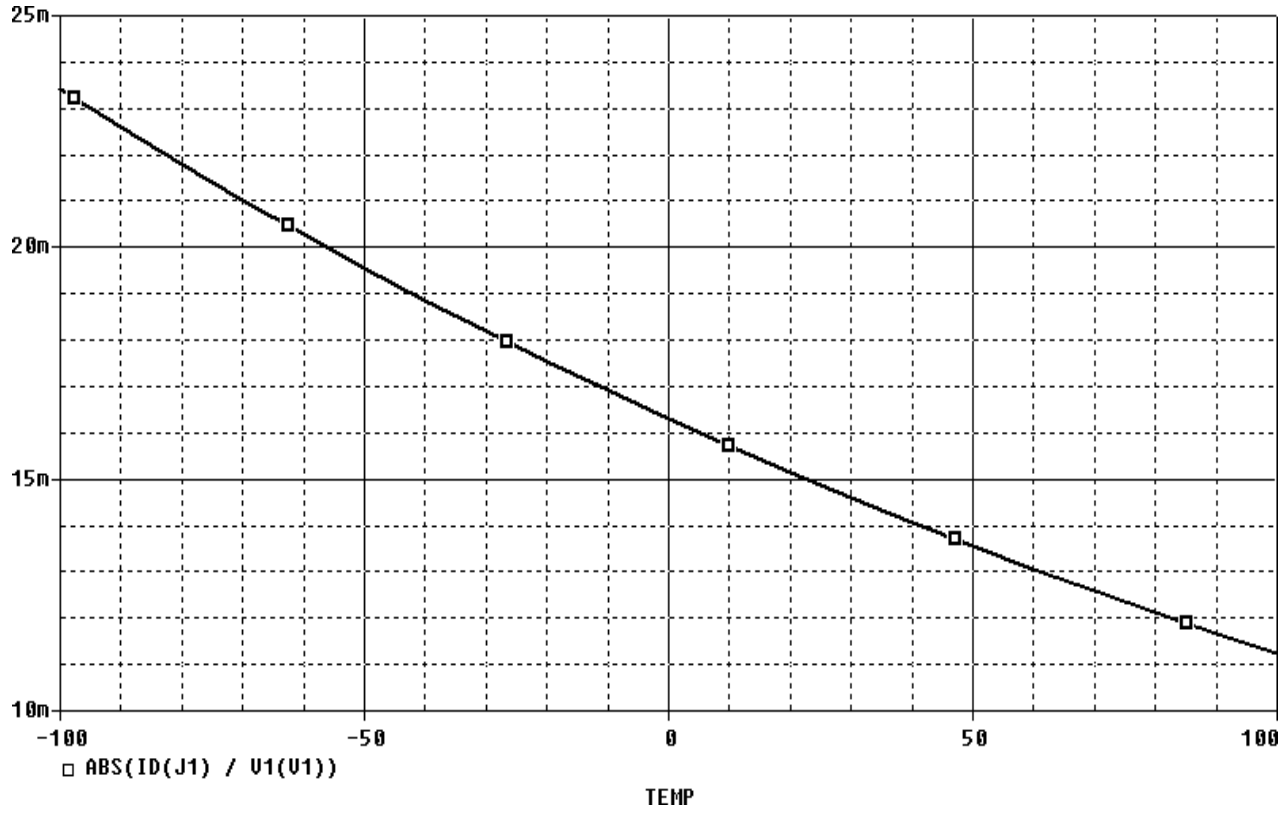
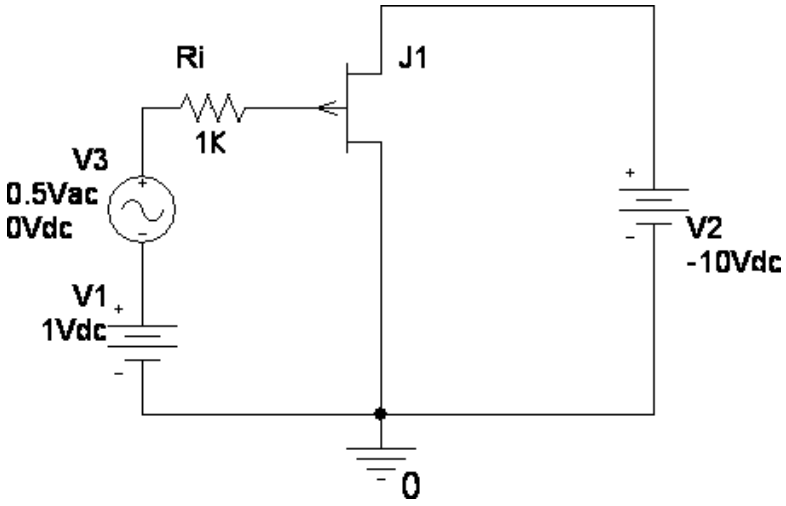


Рисунок 3.27 – Залежність крутизни транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом p-типу від температури при V1 = 0,5 В, V2 = -10 В

Результати моделювання (рис. 3.27) Вони представляють залежність крутизни транзистора типу 2N3331 від температури в діапазоні ± 100° С.

3.4.9 Дослідження частотних властивостей польового транзистора.

З бібліотеки Source.olb на робочому полі розміщується джерело напруги VAC, з бібліотеки Analog.olb розміщується резистор Ri, що імітує внутрішній опір джерела напруги. В результаті схема вимірювань приводиться до вигляду згідно рис. 3.28.



J1 - польовий транзистор з керуючим переходом; V1, V2, V3 – джерела напруги;

Ri - внутрішній опір джерела V3

Рисунок 3.28 – Схема вимірювань для дослідження частотних властивостей польового транзистора:

У меню Edit Simulation setting (рис 3.29) На вкладці Analysis у вікні Analysis type вибирається вид аналізу AC Sweep / Noise (розрахунок частотних характеристик) і встановлюються параметри перебудови частоти. В поле Start Frequency встановлюється початкова частота аналізу, в поле End Frequency - кінцева частота аналізу, в поле Points / Decade - число точок на декаду, спосіб зміни частоти (AC Sweep Type) - логарифмічний (logarithmic).

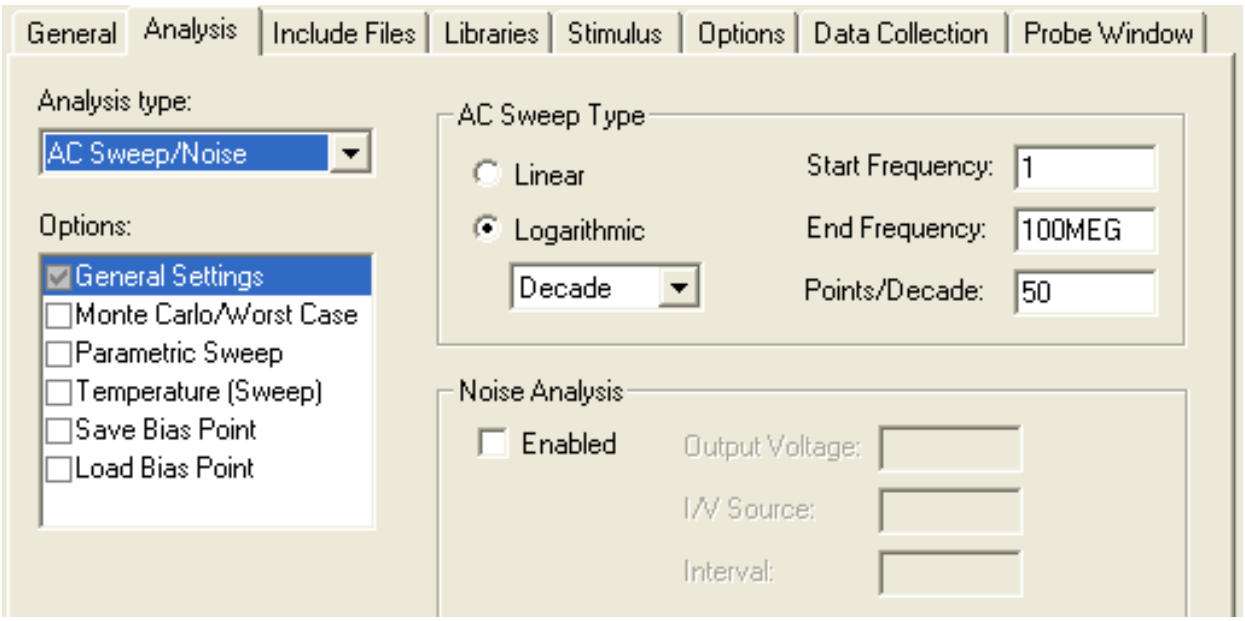


Рисунок 3.29 – Установка параметрів перебудови частоти

Результати моделювання показані на рис. 3.30. Вони представляють залежність струму стоку польового транзистора від частоти, по якій можна визначити значення його вхідний ємност

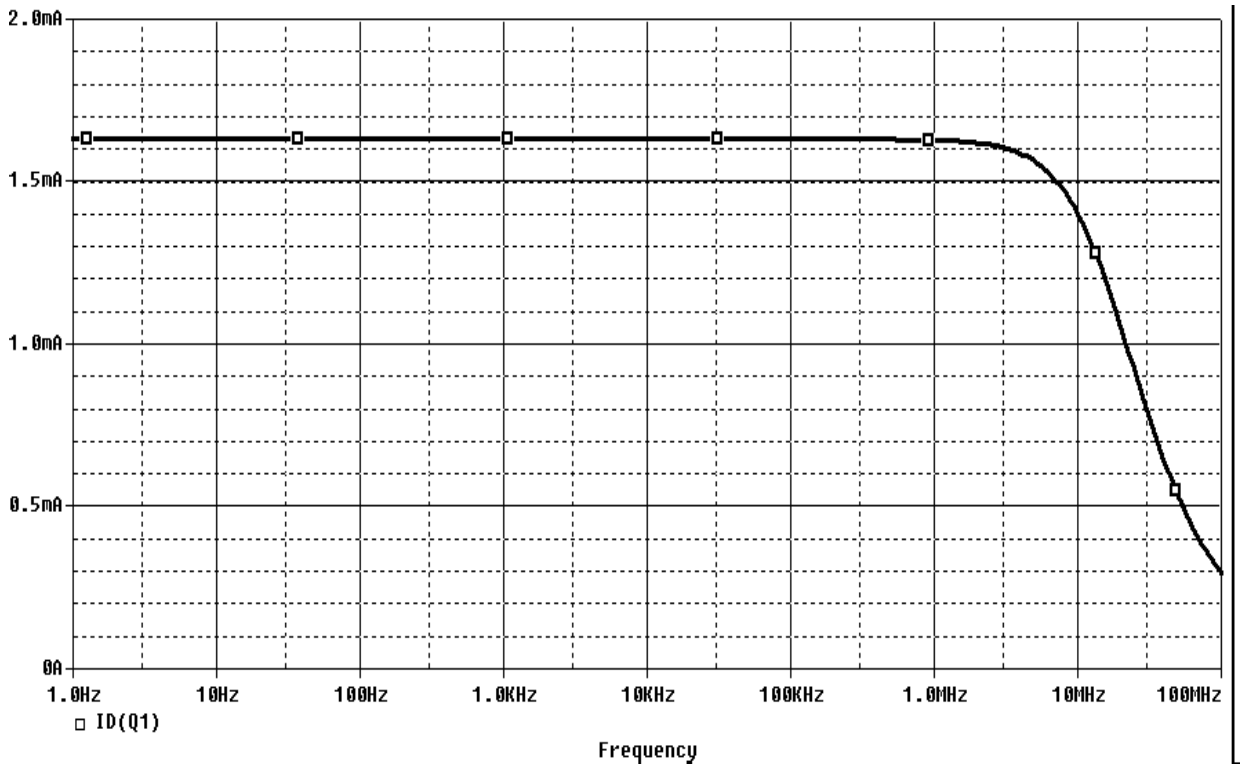
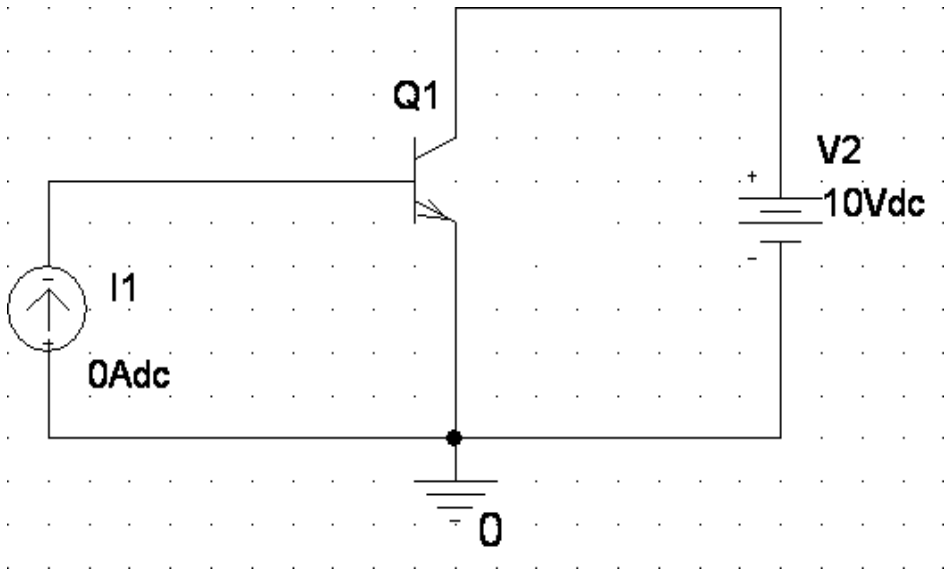


Рисунок 3.30 – Залежність струму стоку транзистора 2N3331 з керуючим переходом і каналом p-типу від частоти при V1 = 1 В, V2 = -10 В

3.5 Дослідження на ПЕОМ біполярних транзисторів

3.5.1 Дослідження ВАХ і параметрів біполярного транзистора.

Дослідження проводиться відповідно до еквівалентної схемою вимірювань рис. 3.31.



Q1 - БТ n-p-n-типу; I1 - джерело струму; V2 - джерела напруги

Рисунок 3.31 – Схема вимірювань, яка використовується для дослідження ВАХ БТ

Дослідження здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму DC Sweep.

3.5.2 Методика дослідження статичних вхідних ВАХ біполярного транзистора

Дослідження технологічного розкиду ведеться на основі схеми вимірювань, представленої на рис. 3.32.

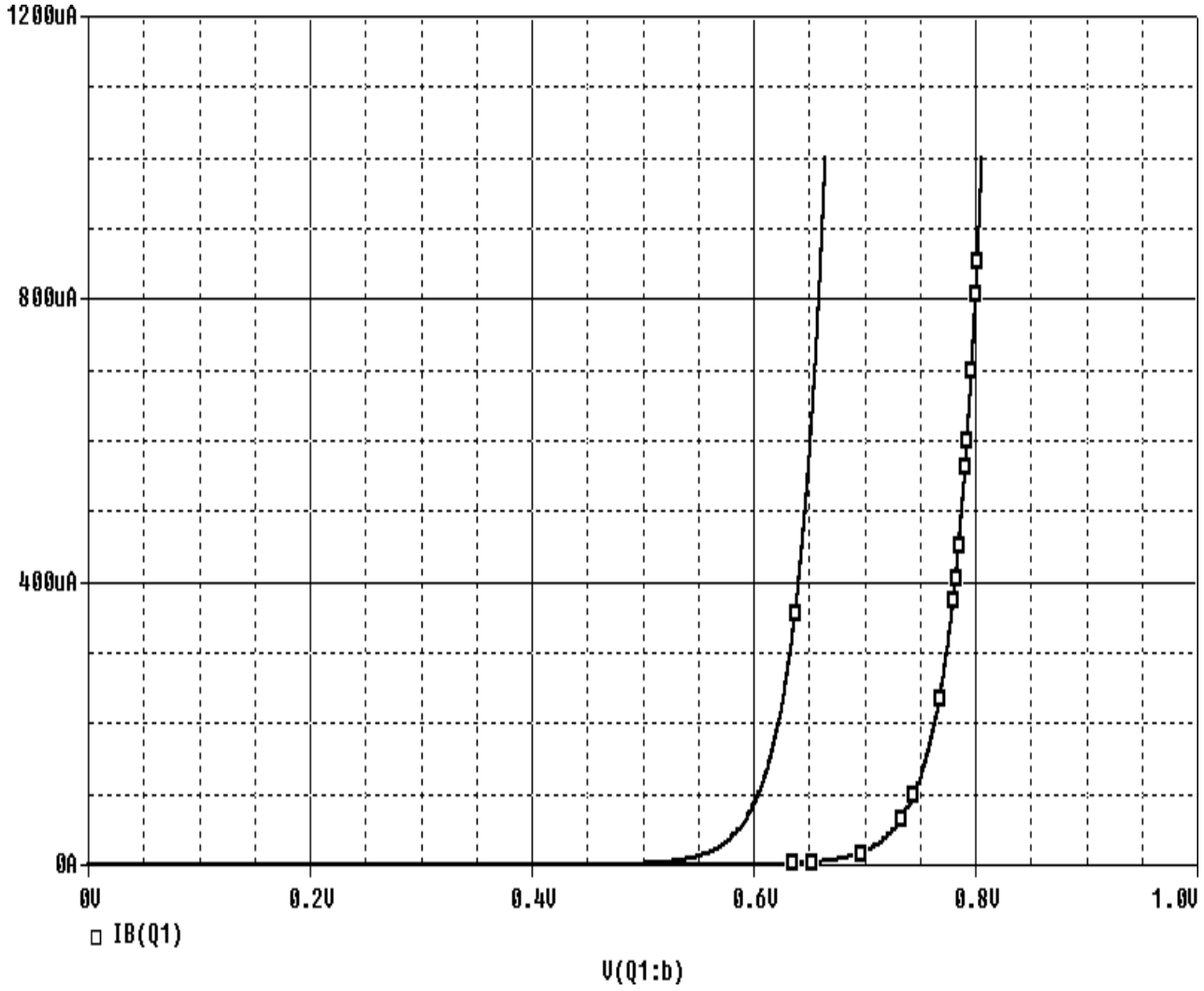


Рисунок 3.32 – Сімейство статичних вхідних ВАХ транзистора ВС547

Результати моделювання, наведені на рис 3.32 Представляють сімейство статичних вхідних ВАХ транзистора типу ВС547.

3.5.3 Методика дослідження статичних вихідних ВАХ біполярного транзистора

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

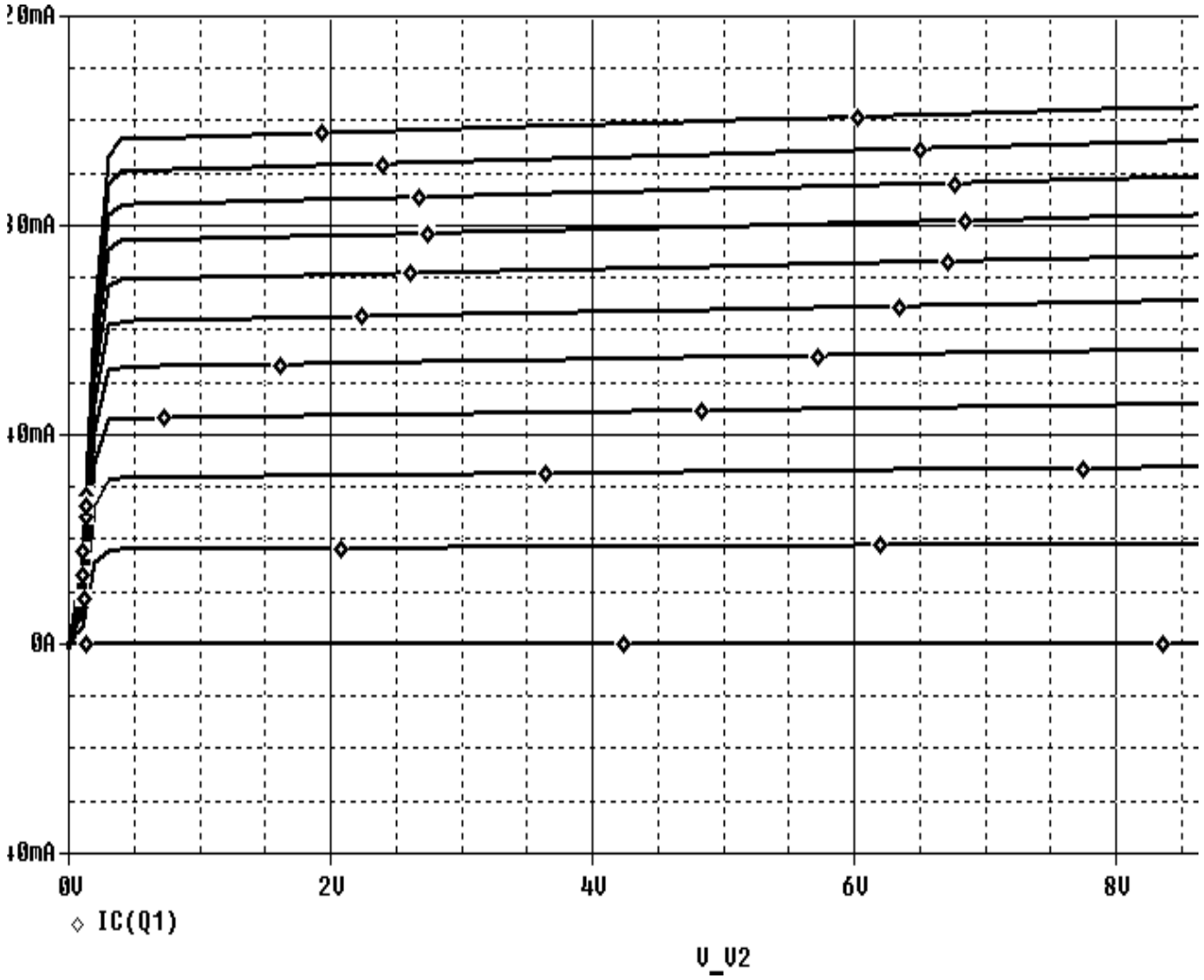
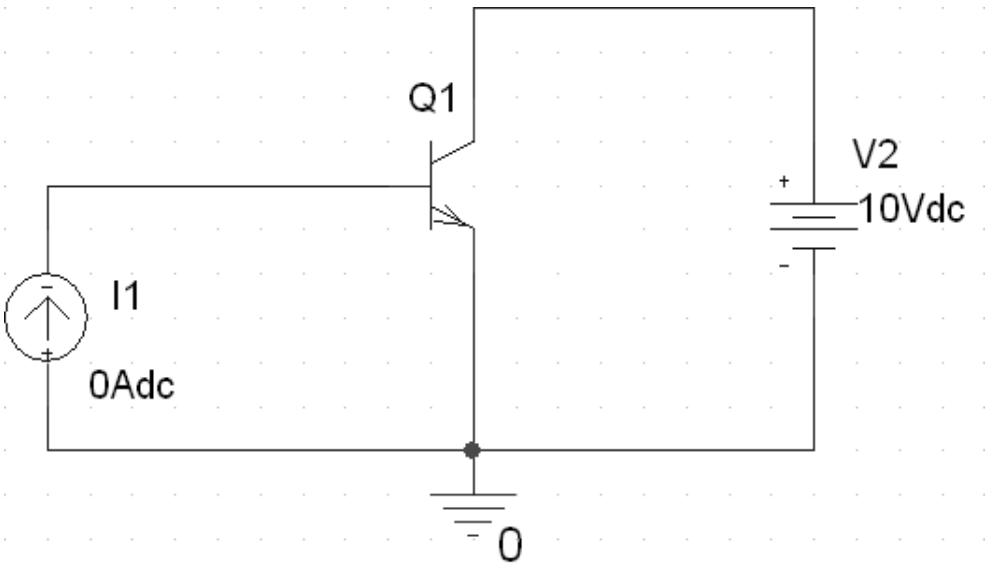


Рисунок 3.33 – Сімейство статичних вихідних ВАХ біполярного транзистора BC547

3.5.4 Дослідження технологічного розвитку ВАХ і параметрів біполярного транзистора

Дослідження технологічного розкиду ведеться на основі схеми вимірювань, представленої на рис. 3.34.



Q1 - БТ n-p-n-типу; I1 - джерело струму; V1 - джерело напруги

Рисунок 3.34 – Схема вимірювань для дослідження технологічного розкиду ВАХ БТ

Статистично змінним параметром математичної моделі біполярного транзистора при моделюванні є максимальний коефіцієнт передачі струму в схемі з загальним емітером BF .

Дослідження технологічного розкиду статичних ВАХ біполярного транзистора здійснюється за допомогою процедури багатоваріантного розрахунку режиму по постійному струму (DC Sweep) і статистичного аналізу за методом Монте-Карло (Monte-Carlo).

3.5.5 Методика дослідження технологічного розкиду статичних вхідних ВАХ біполярного транзистора.

Результати моделювання, зображені на рис 3.35, Представляють сімейство вхідних ВАХ п'яти однотипних транзисторів, відмінність яких обумовлено технологічним розкидом.

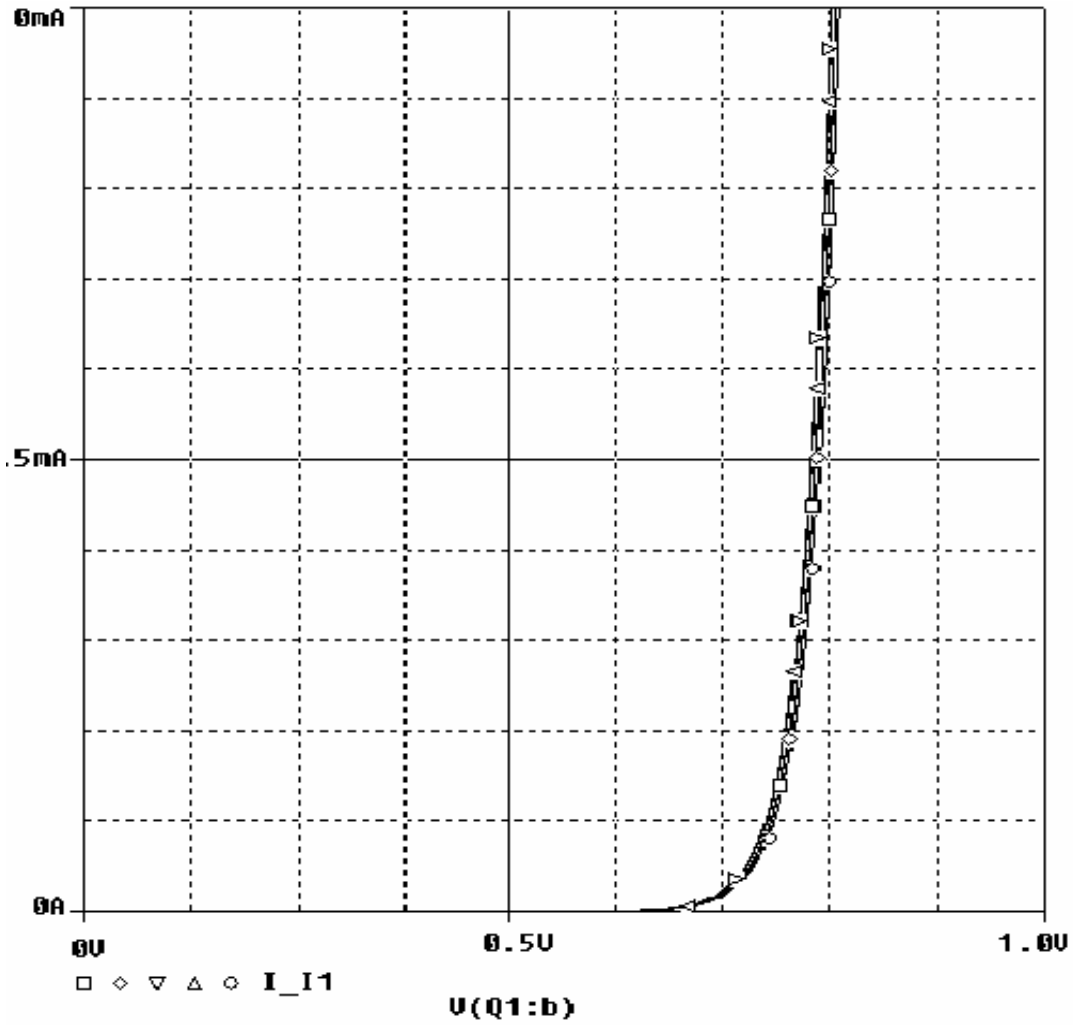


Рисунок 3.35 – Статичні вхідні ВАХ транзистора BC547
з урахуванням технологічного розкиду при V2 = 10 В

Результати моделювання, зображені на рис. 3.36, Представляють сімейство вихідних ВАХ п'яти однотипних транзисторів, відмінність яких обумовлено технологічним розкидом.

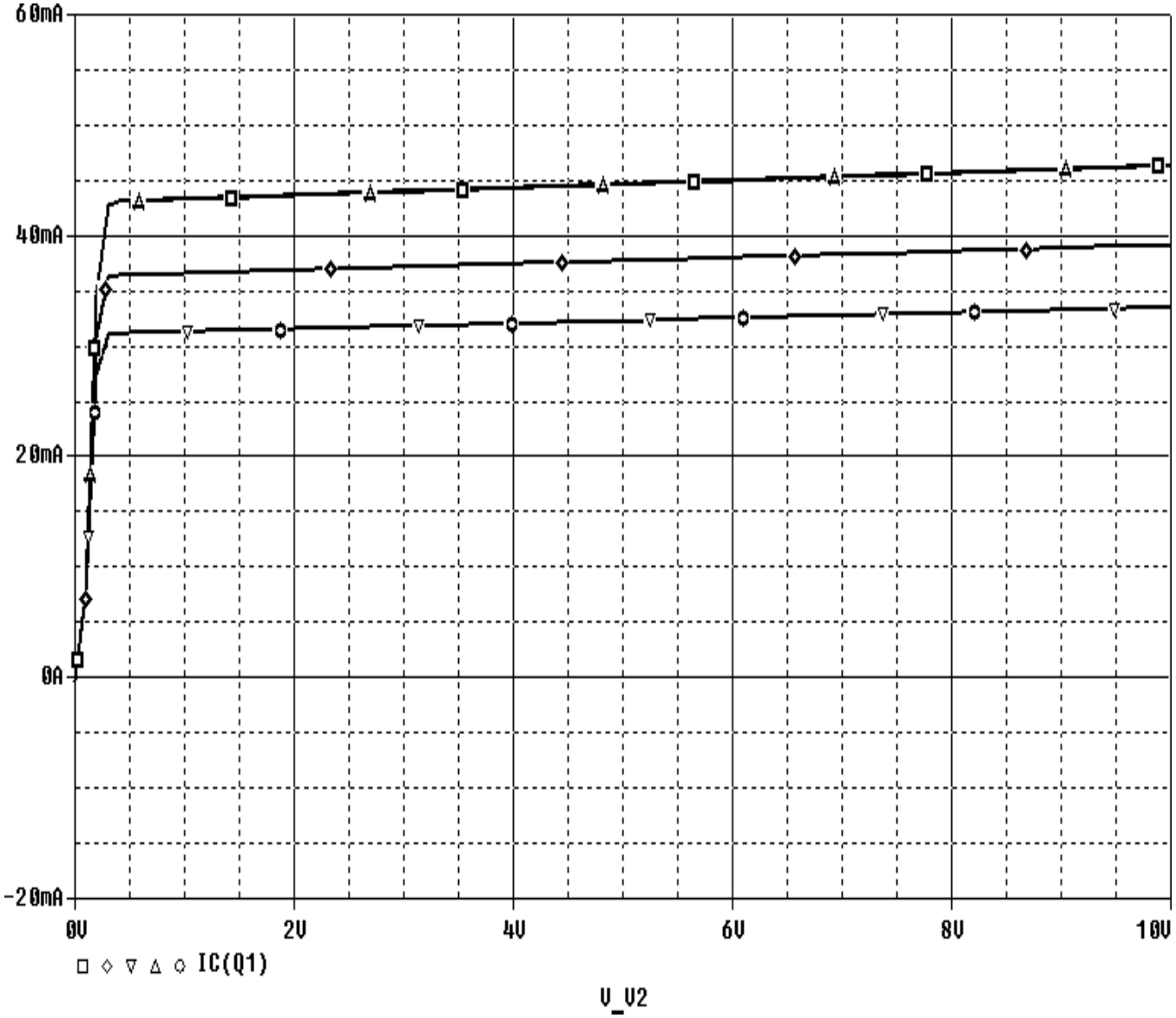


Рисунок 3.36 – Статичні вихідні ВАХ транзистора BC547
з урахуванням технологічного розкиду при I1 = 300мкА

3.5.6 Методика дослідження температури залежності статичних вхідних ВАХ біполярного транзистора.

Активізується процес моделювання за допомогою вибору в меню Pspice пункту Run або через активацію клавіші Run PSpice на панелі інструментів схемотехнического редактора Capture.

Результати моделювання, наведені на рис. 3.37, представляють сімейство вхідних ВАХ біполярного транзистора типу BC547 для трьох значень температури (рис. 3.37).

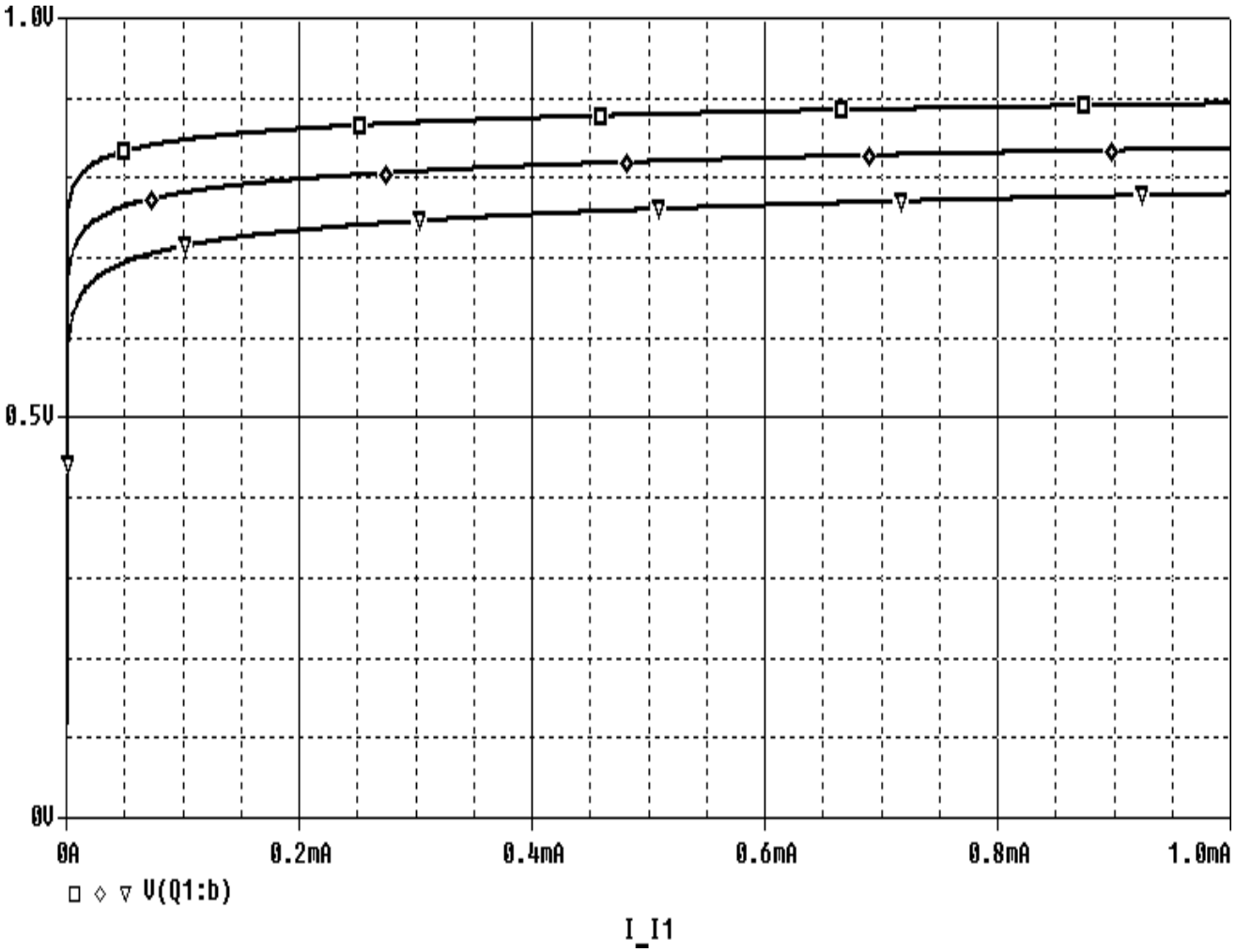


Рисунок 3.37 – Сімейство статичних вхідних ВАХ транзистора BC547 при різних значеннях температури

3.5.7 Методика дослідження температури залежності коефіцієнта посилення по току біполярного транзистора.

Для відображення результатів моделювання у вигляді коефіцієнта передачі по току від температури, в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв PSpise A / D в якості опції по осі оу встановлюється відношення струму

колектора до струму бази (меню Trace - Add Trace).

Результати моделювання наведені на рис. 3.38. Результати представляють графік залежності коефіцієнта передачі по току від температури для біполярного транзистора типу BC547.

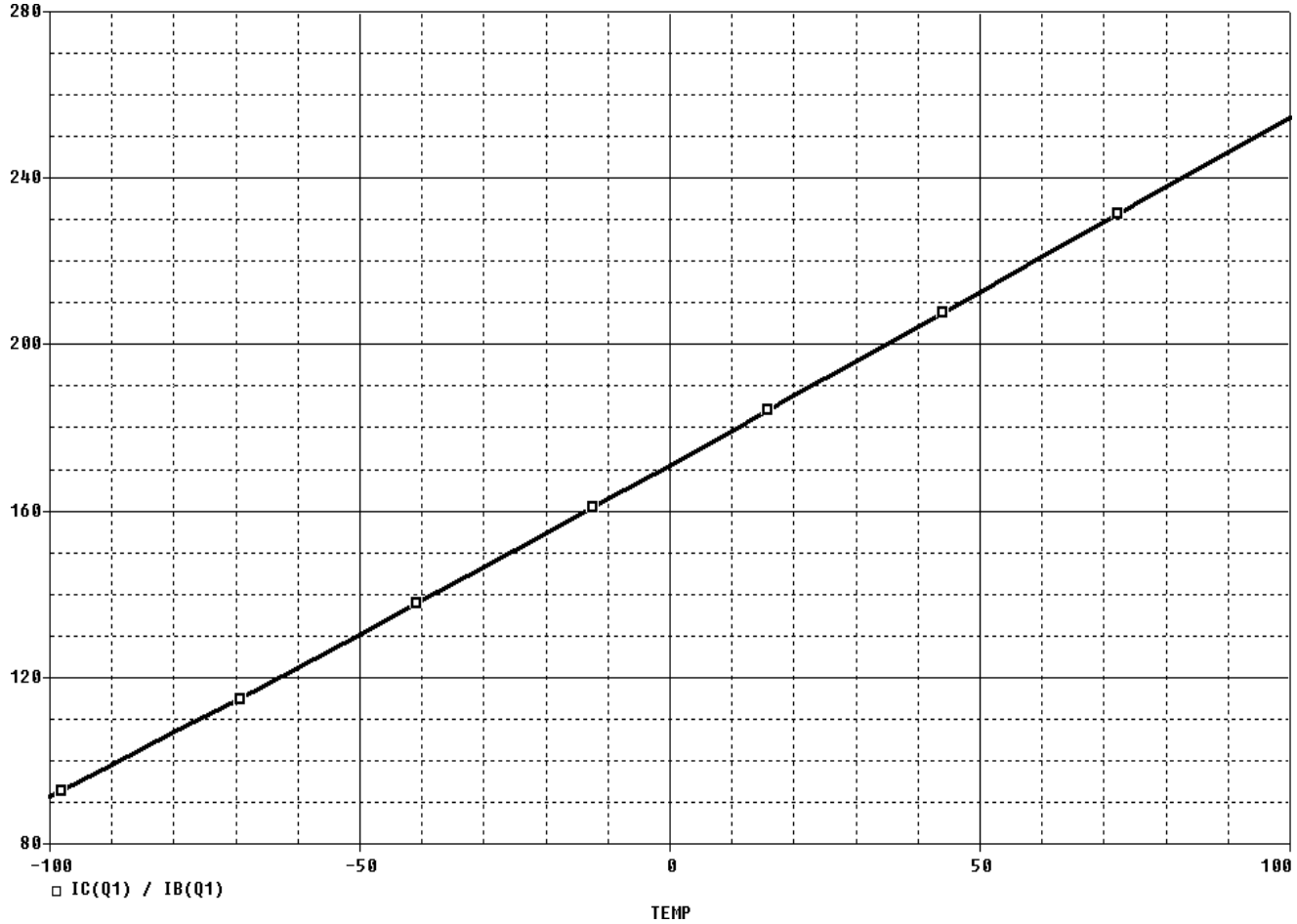


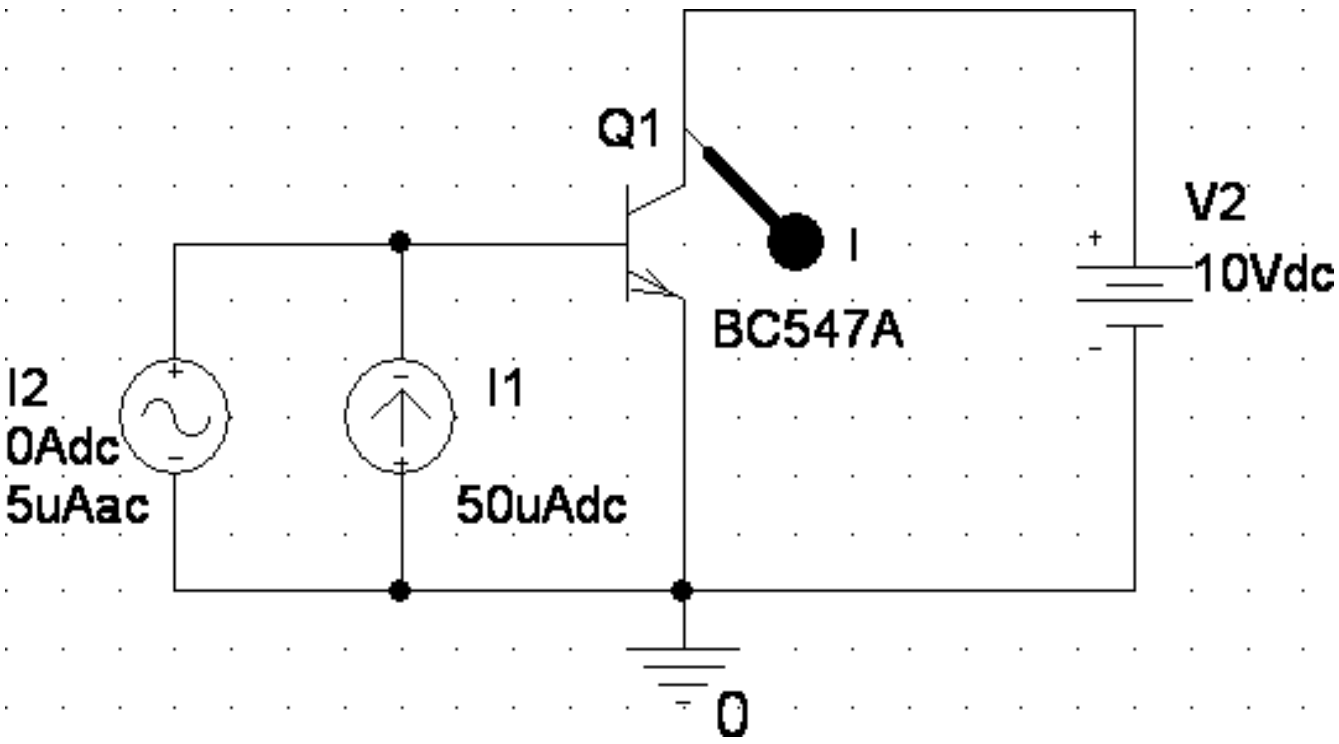
Рисунок 3.38 – Графік залежності коефіцієнта передачі по току транзистора BC547
від температури при I1 = 100 мкА, V2 = 10 В

3.5.8 Дослідження частотних властивостей біполярного транзистора

Дослідження включає наступні етапи.

На робочому полі схемотехнического редактора Capture встановлюються необхідні значення джерел I1 і V2, що задають режим роботи БТ.

На робочому полі схемотехнического редактора Capture розміщується джерело струму IAC (бібліотека Source.lib). Амплітуда змінної складової (Aac) встановлюється не більше 10% від значення джерела I1. В результаті схема вимірювань приймає вид, представлений на рис. 3.40.



Q1 - БТ n-p-n-типу; I1 - джерело постійного струму;
I2 - джерело змінного струму; V2 - джерело напруги

Рисунок 3.40 – Схема вимірювань для дослідження частотних властивостей БТ

Для відображення результатів моделювання у вигляді коефіцієнта передачі по току від частоти, в програмі моделювання аналогових і змішаних пристроїв PSpise A / D в якості опції по осі оу встановлюється відношення струму колектора до струму бази (меню Trace Add Trace).

Результати моделювання (рис. 3.41) Представляють графік залежності коефіцієнта посилення по току від частоти, що характеризує частотні властивості

біполярного транзистора.

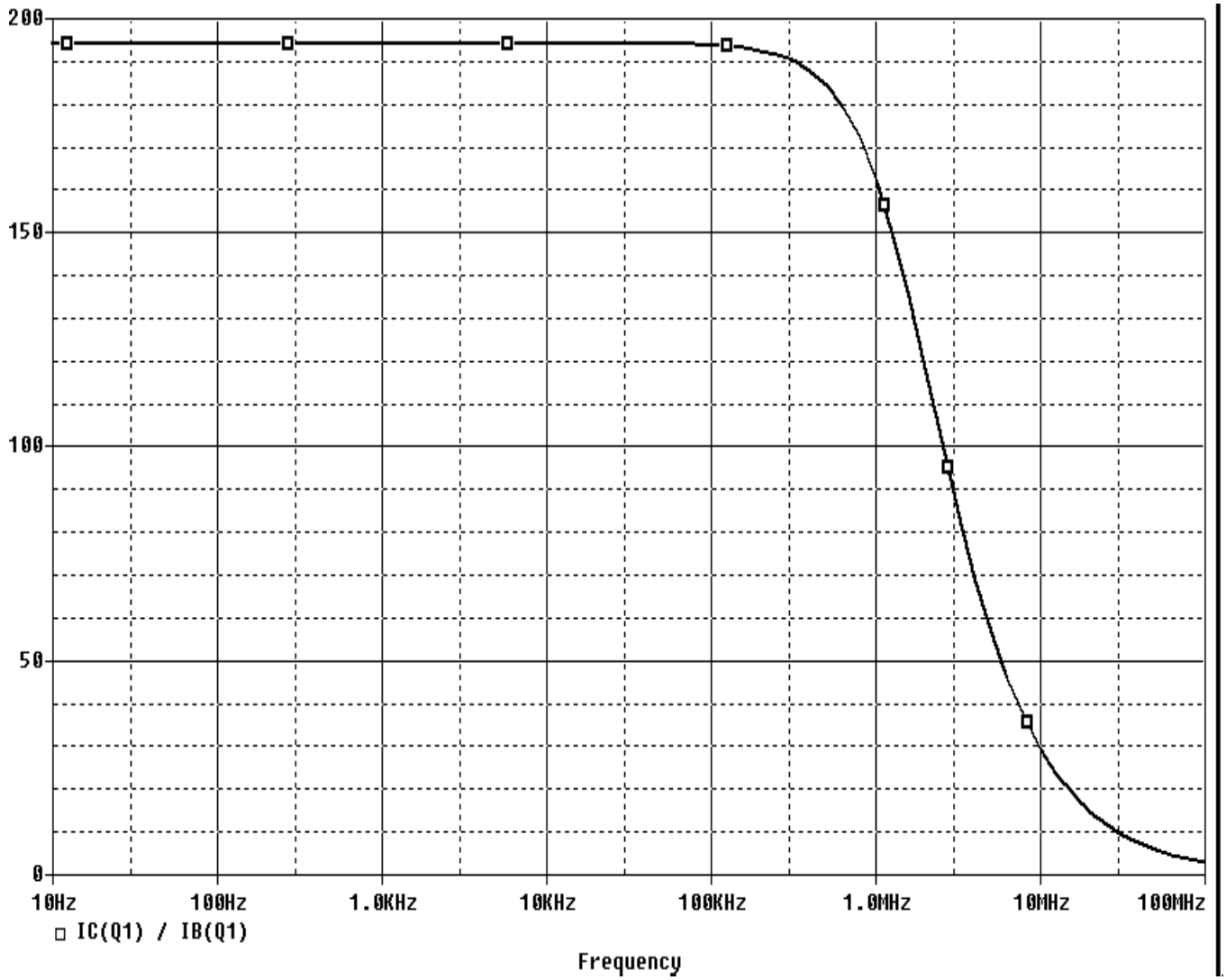


Рисунок 3.41 – Графік залежності коефіцієнта передачі по струму від частоти

ВИСНОВКИ

У процесі виконання атестаційної роботи зроблено огляд методів та засобів дослідження характеристик напівпровідникових елементів, що розглядаються у курсі «Твердотільна електроніка».

Досліджено методи вольтметра-амперметра, квазіступеневий метод, програмні засоби OrCad 1.9, Electronics Workbench.

Я рекомендую програму OrCAD 9.2 вона має зручний інтерфейс, що підійде для новачків. Завдяки швидкому доступу, зручній системі пошуку і можливості вставки компонентів в проект безпосередньо із зовнішньої бази, значно скорочується час розробки друкованої плати.

Пошук компонентів може здійснюватися по їх електричним і фізичними характеристиками, а також даними про виробника.

Завдання до атестаційної роботи виконано у повному обсязі, мета роботи досягнута.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Пасинков В. В. Напівпровідникові прилади: навч. для вузів Л. К. Чиркин,Санкт-Питербург: Лань, 2001. - 480 с.

2. Опадчій Ю. Ф. Аналогова і цифрова електроніка (Повний курс): навч. / О. П. Глудкін, А. І. Гуров; ред. О. П. Глудкін. - М.: Гаряча лінія - Телеком, 2000. - 768 с .: іл.

3. Гуртів В. А. Твердотельная електроніка: навч. допомога, Доп. - М .: Техносфера, 2005. - 408 с.

4. Сурані А. Я. LabVIEW 7: довід. за функціями Москва : ДМК Пресс, 2005. - 512 с.

5. Степаненко І. П. Основи мікроелектроніки: навч. посібник для вузів / І. П. Степаненко. - 2-е изд., Перераб. і доп. - М .: Лабораторія Базових Знань, 2001. - 488 с .: іл.

6. Напівпровідникові прилади: Діоди, тиристори, оптоелектронні прилади: довід. // заг. ред. Н. А. Горюнов. - М .: Енергоіздат, 1987. - 743 с.

7. Жеребцов І. П. Основи електроніки, Перераб. і доп. - Л .: Вища школа. Ленінградське отд-ня, 1990. - 352 с .: іл.

8. Разевиг, В. Д. Система проектирования *OrCAD* 9.2 : Солон-Р, 2001