

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Радіотехнічний факультет
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра радіотехнічних пристроїв та систем
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ (підпис) _____ (ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка
за спеціалізацією Радіотехнічні інформаційні технології
_____ (код і назва спеціальності)

на тему: Пристрій вимірювання параметрів напівпровідникових приладів для формування їх математичних моделей САПР

Виконав (-ла): студент (-ка) VI курсу, групи РТ-41 мп
(шифр групи)

Грицьків Іван Ростиславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

_____ (підпис)

Науковий керівник к.т.н., доц Піддубний В.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Консультант ох. праці к.т.н., доц. Каштанов С.Ф.
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент ст. викл. Тершин М.О.
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____ (підпис)

Київ – 2018 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Факультет (інститут)

Радіотехнічний факультет
(повна назва)

Кафедра

радіотехнічних пристроїв та систем
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність

172 Телекомунікації та радіотехніка

спеціалізація

Радіотехнічні інформаційні технології
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис)

(ініціали, прізвище)

« » 20 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Грицевий Іван Ростиславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Пристрій вимірювання параметрів
капівпробідникових приладів для формування їх
математичних моделей САПР.

науковий керівник дисертації

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «06» листопада 2018 р. № 4093-с

2. Строк подання студентом дисертації

3. Об'єкт дослідження Пристрій вимірювання характеристик
та параметрів капівпробідників.

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Статистичні, динамічні, темпе-
ратурні характеристики та параметри капівпробідників.

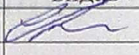
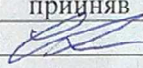
5. Перелік завдань, які потрібно розробити Розробити алгоритм
вимірювання частотних та температурних характе-
стик. Інтегрувати алгоритм формування параметрів

тедені Гумеля - Лука в програмі керування. Підвищити точність пристрою. Розширити функціонал програми. Змагнутувати пристрій в корпус. Дослідити результати.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного (графічного) матеріалу _____
близько 20 слайдів, що повністю висвітлює результати роботи.

7. Орієнтовний перелік публікацій 3 публікації

8. Консультанти розділів дисертації*

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|---------------|---|---|---|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці | Каштанов С.Ф., к.т.н., доцент |  |  |
| | | | |

9. Дата видачі завдання 26.09.2018 р.

Календарний план

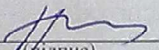
| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| | Розроб. алг. вим. частотних хар. | | |
| | Розроб. алгор. вим. температур. хар. | | |
| | Вителр. алгор. функ. хар. Гумеля - Лука | | |
| | Підвищ. точність пристрою | | |
| | Розширити функціонал програми. | | |
| | Дослідити експеримент. результати | | |
| | | | |
| | | | |

Студент


(підпис)

Грицьович І. Р.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації


(підпис)

Піддубний В. О.
(ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено наукового керівника

РЕФЕРАТ

Грищевич І. Р. Пристрій вимірювання параметрів напівпровідникових приладів для формування їх математичних моделей САПР.

Дисертація на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістр за спеціальністю 172 Телекомунікації та радіотехніка. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Магістерська дисертація виконана на 89 сторінках, містить 45 рисунків та 32 таблиці.

Ключові слова: транзисторний характерограф, параметри напівпровідників, модель Гумеля-Пуна, параметри моделі САПР, вольт-амперні характеристики.

Актуальність теми — підвищення ефективності проектування, уникнення налаштування після проектування, підвищення надійності та зменшення загальної кількості елементів в радіо-електронних схемах. Робота пов'язана з науковими програмами кафедри РТПС.

Мета дослідження — підвищити ефективність проектування за рахунок розробки пристрою вимірювання параметрів напівпровідників, покращити процес навчання студентів шляхом впровадження пристрою в навчальний процес.

Об'єкт дослідження — пристрій вимірювання характеристик та параметрів напівпровідників.

Предмет дослідження — статичні, динамічні, температурні характеристики та параметри напівпровідників.

Метод дослідження — вимірювання за допомогою розробленого пристрою.

Наукова новизна — інтегрування в програму керування пристроєм алгоритму формування параметрів моделі САПР з експериментальних даних.

Практичне значення — в результаті дослідження отримано пристрій вимірювання характеристик напівпровідників та формування параметрів їх

моделі САПР, що дозволить підвищити ефективність проектування радіоелектронної апаратури та процес навчання студентів в відповідних дисциплінах.

РЕФЕРАТ

Грицевич И. Р. Устройство измерения параметров полупроводниковых приборов для формирования их математических моделей САПР.

Диссертация на соискание образовательно-квалификационного уровня магистр по специальности 172 Телекоммуникации и радиотехника. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

Магистерская диссертация выполнена на 89 страницах, содержит 45 рисунков и 32 таблицы.

Ключевые слова: транзисторный характерограф, параметры полупроводников, модель Гумеля-Пуна, параметры модели САПР, вольт-амперные характеристики.

Актуальность темы — повышение эффективности проектирования, избежать настройки после проектирования, повышение надежности и уменьшение общего количества элементов в радио-электронных схемах. Работа связана с научными программами кафедры РТПС.

Цель исследования — повысить эффективность проектирования за счет разработки устройства измерения параметров полупроводников, улучшить процесс обучения студентов путем внедрения устройства в учебный процесс.

Объект исследования — устройство измерения характеристик и параметров полупроводников.

Предмет исследования — статические, динамические, температурные характеристики и параметры полупроводников.

Метод исследования — измерение с помощью разработанного устройства.

Научная новизна — интегрирование в программу управления устройством алгоритма формирования параметров модели САПР экспериментальных данных.

Практическое значение — в результате исследования получено устройство измерения характеристик полупроводников и формирования

параметров их модели САПР, позволит повысить эффективность проектирования радио-электронной аппаратуры и процесс обучения студентов в соответствующих дисциплинах.

ABSTRACT

Hrytsevych I. R. Device for measuring semiconductor characteristics and extracting their mathematical models of CAD.

The dissertation for the educational qualification level of a Master in the specialty 172 Telecommunications and Radio Engineering. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

The work was carried out on 87 pages with 17 references to the scientific literature. The work includes 45 figures and 32 tables.

Keywords: transistor curve tracer, semiconductor parameters, Gummel-Poon model, CAD model parameters, amper-volt characteristics.

Topicality of the theme — increasing the effectiveness of design, avoiding the configuration after design, increasing reliability and reducing the total number of elements in radio-electronic circuits. The work is related to the scientific programs of the RTPS Department.

The goal of the research — to improve the design efficiency by developing a semiconductor parameter measurement device, improving the student learning process by introducing the device into the study process.

The object of research — the device for measuring the characteristics and parameters of semiconductors.

Subject of research — static, dynamic, temperature characteristics and parameters of semiconductors.

The method of research — measurement using the developed device.

Scientific novelty — integration of algorithm for CAD model parameters forming from experimental data in the control program of the device.

Practical significance — the result of the research is a device for measuring the characteristics of semiconductors and forming parameters of their CAD model, which will increase the efficiency of designing radio-electronic equipment and the process of students learning in the relevant disciplines.

ЗМІСТ

| | |
|--|----|
| ВСТУП..... | 11 |
| 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АНАЛОГІВ..... | 13 |
| 1.1 Характерограф Райнера Шустера..... | 13 |
| 1.2 Лабораторний стенд LESO3..... | 14 |
| 1.3 Висновки..... | 19 |
| 2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ..... | 20 |
| 2.1 Розробка вузлів живлення | 21 |
| 2.2 Вибір мікроконтролера, схеми керування реле та USB-UART конвертера..... | 23 |
| 2.3 Схема формування тестових напруг..... | 25 |
| 2.4 Схема вимірювання..... | 26 |
| 2.5 Спроектований пристрій..... | 28 |
| 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ ЧАСТИНИ..... | 31 |
| 3.1 Розробка програми керування пристроєм з графічним інтерфейсом..... | 31 |
| 3.2 Дослідження розбіжності параметрів транзисторів. Алгоритм екстракції параметрів з експериментальних даних..... | 37 |
| 3.3 Алгоритм вимірювання частотних характеристик..... | 48 |
| 3.4 Алгоритм вимірювання теплових характеристик..... | 52 |
| 3.5 Дослідження впливу нагрівання кристалу транзистора в процесі вимірювання..... | 58 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ...65 | |
| 4.1 Визначення основних потенційно-небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідної роботи..... | 66 |
| 4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни та виробничої санітарії..... | 66 |
| 4.2.1 Розрахунок концентрації аерозолу свинцю в повітрі робочої зони при проведенні технологічного процесу пайки ЕРЕ..... | 66 |
| 4.2.2 Вплив інфрачервоного випромінювання на організм людини при проведенні пайки ЕРЕ..... | 69 |
| 4.2.3 Електробезпека..... | 71 |
| 4.2.4 Освітлення робочого місця..... | 73 |
| 4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях..... | 74 |
| 4.3.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації..... | 74 |
| 4.3.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС..... | 76 |

| | |
|--|----|
| 4.3.3 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях..... | 77 |
| 5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ..... | 79 |
| 5.1 Опис ідеї проекту..... | 79 |
| 5.2 Технологічний аудит ідеї проекту..... | 80 |
| 5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту..... | 81 |
| 5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту..... | 85 |
| 5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту..... | 87 |
| 5.6 Висновки..... | 89 |
| ВИСНОВКИ..... | 90 |
| ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ..... | 92 |
| ДОДАТОК А..... | 94 |

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

РЕА – радіо-електронна апаратура

САПР – середовище автоматизованого проектування

НП – напівпровідник

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

СЕ – спільний емітер

СБ – спільна база

СК – спільний колектор

ВСТУП

При проектуванні РЕА часто виникає проблема відсутності необхідних характеристик напівпровідників. Це спричиняє ряд незручностей таких як налаштування схеми після проектування, відмова від використання компонентів з обмеженою специфікацією, непрацездатність схеми при низьких чи високих температурах, що може бути пов'язано з впливом температурних параметрів компонентів, що не враховані при проектуванні. В специфікаціях на компоненти важливі параметри, такі як коефіцієнт підсилення струму бази біполярного транзистора вказують в діапазоні значень з мінімальним, типовим та максимальним значеннями і відмінність між мінімальним та максимальним значенням цього параметру складає декілька разів. Розробнику приходится орієнтуватися на мінімальне значення цього параметру, це призводить до збільшення числа каскадів та загальної кількості компонентів в схемі.

Розробник також стикається з проблемою відсутності бібліотек для САПР при використанні компонентів вироблених в групі країн экс-членів СНД. Тому завданням магістерської дисертації стало вдосконалення алгоритмів роботи, розширення функціоналу та підвищення точності пристрою, для вимірювання характеристик напівпровідників, прототип якого був розроблений в бакалаврській роботі. Також важливим завданням є інтеграція алгоритму обрахунку параметрів математичної моделі транзистора у програму керування пристроєм. Завдяки цьому користувач зможе не лише вимірювати характеристики компонентів, а й в автоматичному режимі отримувати основні параметри моделі Гумеля-Пуна біполярного транзистора, що використовується більшістю САПР. Це дозволить безпосередньо використати ці параметри для створення або редагування бібліотеки САПР.

Розширюючи функціонал пристрою в магістерській дисертації буде розроблено алгоритм вимірювання частотних та температурних характеристик. Буде проведено аналіз впливу паразитного нагрівання

компоненту під час вимірювання на достовірність результатів та запропоновані методи зменшення цього впливу.

Розроблюваний пристрій та його програмне забезпечення планується використовувати в навчальному процесі при виконанні лабораторних робіт по дослідженню напівпровідників, що дозволить проводити вимірювання з меншою трудоемкістю та більшим функціоналом.

1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД АНАЛОГІВ

Даний розділ повинен підтвердити доцільність даної розробки, виявити вдалі схемо-технічні рішення. Оскільки повного аналогу приладу віднайдено не було, то розглянемо декілька найбільш схожих за функціональним призначенням приладів.

1.1 Характерограф Райнера Шустера

Зовнішній вигляд характерографа приведений на рисунку 1.1. Даний прилад був опублікований в журналі “Electron” за 2009 рік [1].

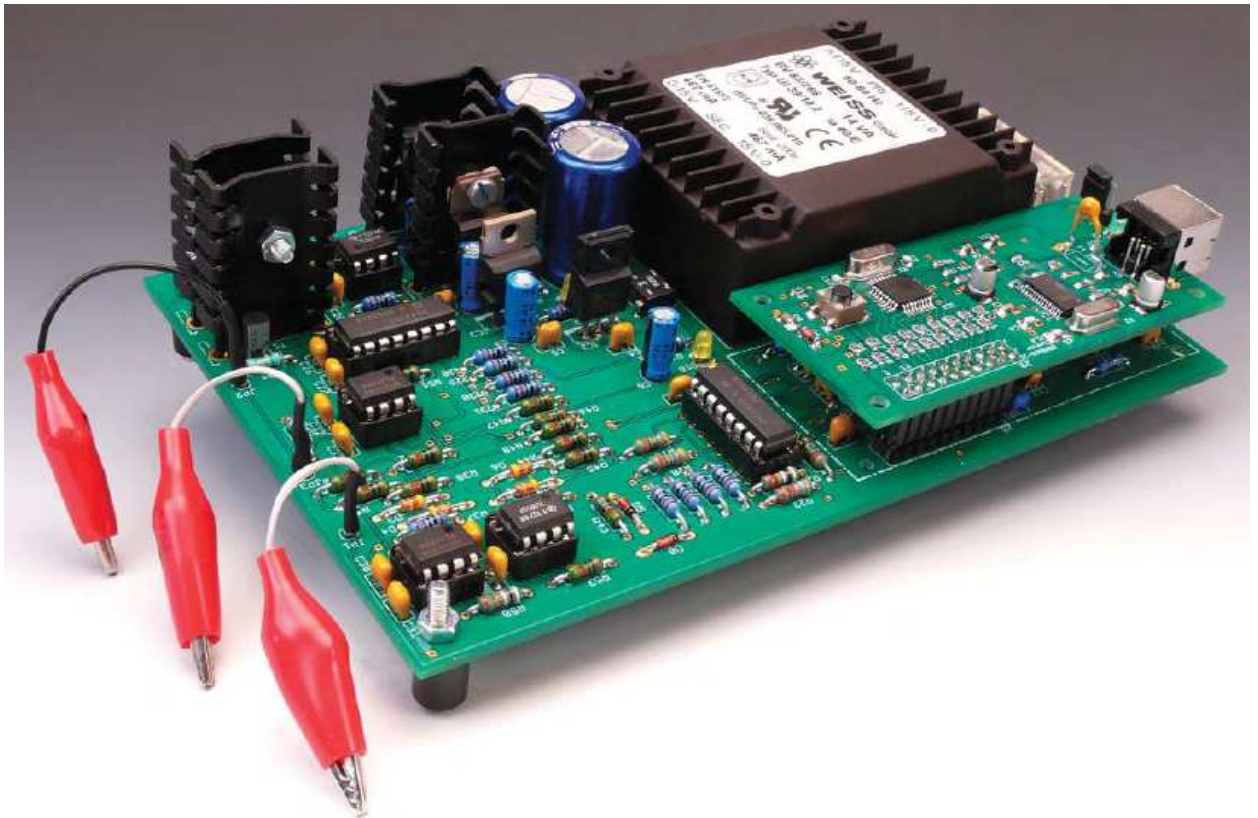


Рисунок 1.1 – Характерограф Райнера Шустера

Прилад підключається через USB порт до комп'ютера використовуючи мікросхему USB-UART конвертер PL2303. Програма керування та відображення інформації працює на операційних системах Windows 2000 та Windows XP. Система може відображати отримані експериментальні характеристики, експортувати дані в Excel, перевіряти ідентичність двох досліджуваних транзисторів, вираховувати коефіцієнт передачі струму бази.

Прилад досліджує біполярні PNP та NPN транзистори та польові P-JFET, N-JFET, P-MOSFET N-MOSFET. Приклад побудови характеристик приведений на рисунку 1.2.

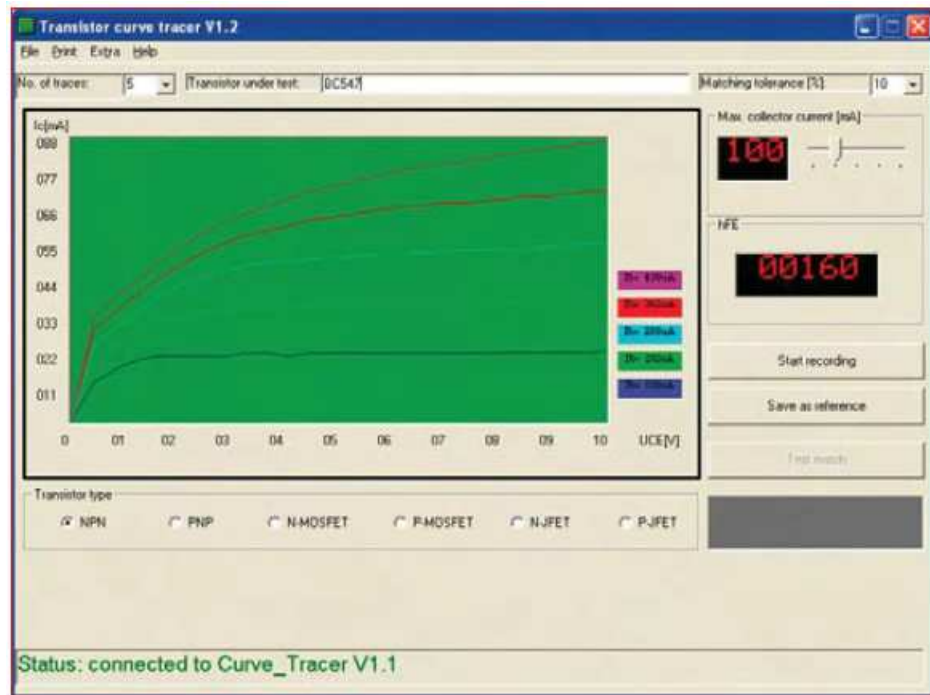


Рисунок 1.2 – Приклад побудови характеристик

До переваг даного приладу можна віднести малі габарити, відображення та введення інформації за допомогою ПК, що зменшує вартість приладу. Також це дозволяє легко експортувати дані в інші програми. Широка номенклатура компонентів які можна досліджувати.

Серед недоліків приладу є те, що він отримує лише вихідну характеристику транзисторів. Через це неможливо екстрагувати багато параметрів моделі транзистора з експериментальних даних.

1.2 Лабораторний стенд LESO3

Лабораторний стенд LESO3 призначений для дослідження характеристик і параметрів напівпровідникових приладів (діодів, біполярних і польових транзисторів, і т.д.). Стенд конструктивно виконаний на одній двосторонній друкованій платі, з одного боку розташовується електрична схема стенду, з іншого - клеми для збірки схеми дослідження [2]. Зовнішній

вигляд стану з комп'ютером в готовому до роботи вигляді приведено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Лабораторний стенд LESO3

Основою стану є однокристальний мікроконвертор ADuC842 фірми Analog Devices, що має в своєму складі 12-розрядні восьмиканальні АЦП і два ЦАП. АЦП використовуються в якості вольтметрів і міліамперметрів, а ЦАП - як джерела регульованої напруги. У сукупності стенд містить два регульованих джерела напруги, два вольтметри і два амперметри.

Приведемо структурну схему пристрою на рисунку 1.4.

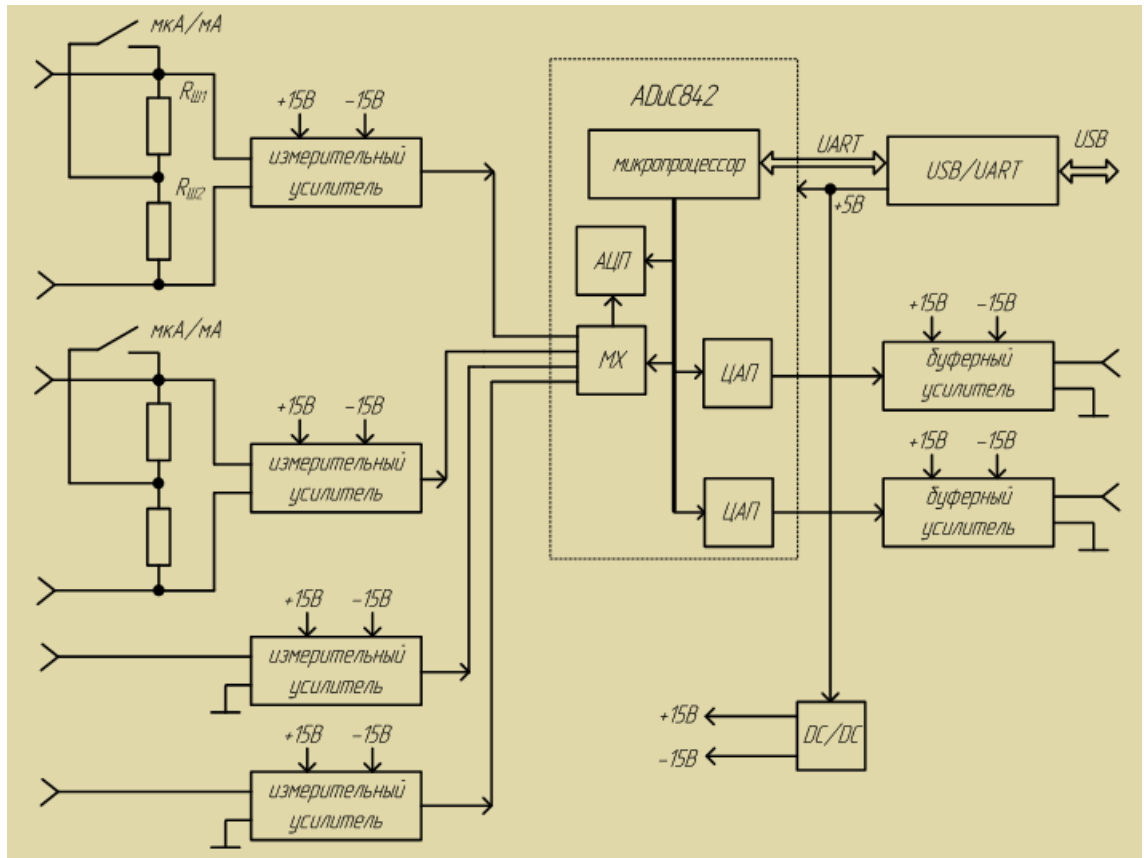


Рисунок 1.4 – Структурна схема LESO3

Прилад має наступні характеристики:

Джерела живлення:

- Кількість: 2
- Діапазон вихідних напруг: -10 .. +10 В
- Точність установки: 12 розрядів
- Захист від короткого замикання

Вольтметри:

- Кількість: 2
- Діапазон вимірювань: -10 .. +10 В
- Вхідний опір: 1МОм
- Точність вимірювання: 12 розрядів
- Захист від підвищеної напруги

Амперметри:

- Кількість: 2
- Регульований діапазон вимірювань:
- $-10 \dots + 10\text{mA}$, опір шунта 10 Ом
- $-10 \dots + 10\text{mA}$, опір шунта 1 кОм
- Точність вимірювання: 12 розрядів
- Захист від перевантажень

Стенд підключається до персонального комп'ютера за допомогою інтерфейсу USB. Програмне забезпечення стенду розроблено в середовищі LabVIEW.

При виконанні лабораторних робіт, студенти за допомогою провідників і клем збирають схему дослідження. Далі, за допомогою органів управління, розташованих на екрані персонального комп'ютера, проводиться вимірювання характеристик приладів. Характеристики виводяться на екрані персонального комп'ютера у вигляді графіків на панелі характерографа, що має настроювані осі X і Y. Лабораторний стенд LESO3 дозволяє проводити вимірювання на змінному струмі (наприклад, при вивченні транзисторного підсилювача).

Вікно програми LESO3 містить три робочі області, у верхній області розташовуються стрілочні індикатори вимірюваних величин - V_1 , V_2 , mA_1 , mA_2 . Ці індикатори завжди відображають значення фізичних величин на клеммах приладу. Під стрілочними індикаторами розташовані відповідні цифрові дисплеї з точним показанням вимірюваної величини.

Робоча область в правій частині екрану призначена для побудови графіків характеристик досліджуваних напівпровідникових приладів. Панель має дві вкладки: Графік XY і Тимчасові характеристики. Вкладка Графік XY призначена для побудови залежностей будь-якого вимірювального каналу від будь-якого іншого каналу. На рисунку 1.5 приведений зовнішній вид програми та приклад побудови характеристик.

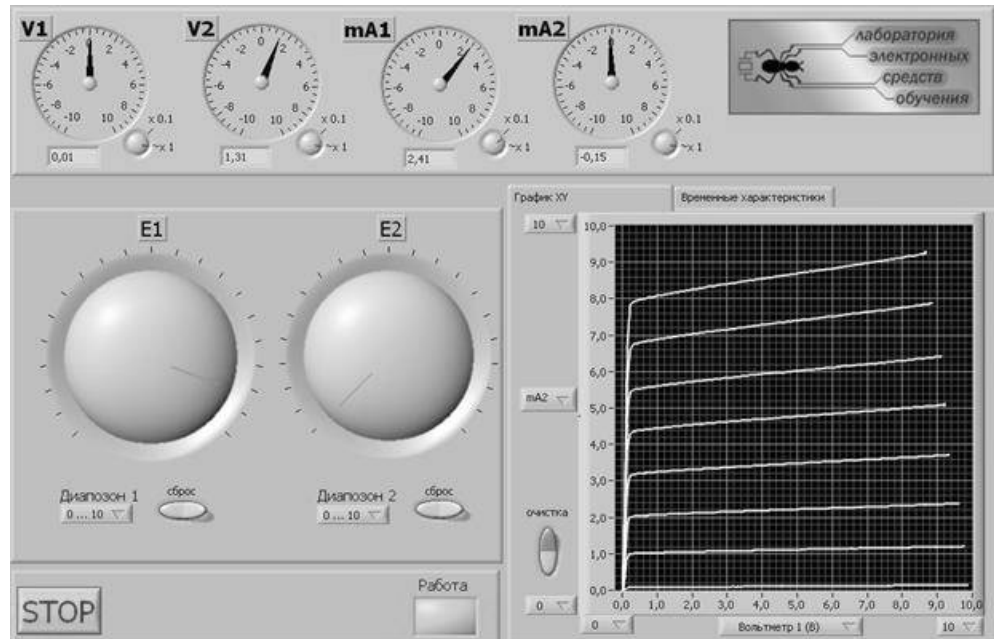


Рисунок 1.5 – Приклад побудови характеристик

Кожна вісь може бути закріплена за одним з вимірювальних каналів, наприклад по осі Y буде відкладатися показання амперметра mA1, а по осі X - показання вольтметра V1. Для кожної осі користувач вибирає максимальну і мінімальну межу відображення графіка. Кнопка очищення очищає робочу область графіку.

Вкладка тимчасові характеристики призначена для дослідження напівпровідникових приладів в квазістатичному режимі. Це особливо актуально при дослідженні діодного випрямляча, а також підсилювача на одному транзисторі. Користувачеві в цьому режимі доступні два графопобудовника. Для осі Y кожного графопобудовника користувач задає відповідність якомусь вимірювальному каналу. По осі X відкладається час. Таким чином, в реальному масштабі часу будується залежність напруги або струму від часу.

Програмне забезпечення лабораторного стенду крім універсальної програми LESO3 включає в себе універсальні модулі для роботи в середовищі LabVIEW, що дозволяє адаптувати і оптимізувати лабораторний стенд під виконання індивідуальних завдань - кінцевий користувач завжди зможе змінити програму для роботи зі стендом на свій розсуд.

У складі з персональним комп'ютером лабораторний стенд LESO3 утворюють вимірювальний комплекс необхідний і достатній для дослідження характеристик напівпровідникових приладів і найпростіших схем їх застосування з достатньою для освітніх цілей точністю.

Ручне складання схеми робить прилад привабливим для освітніх цілей. При використанні стенду LESO3 студент не тільки отримує теоретичні знання про властивості напівпровідникових приладів, але і навик практичної роботи з реальним обладнанням.

Недоліком приладу є те, що він живиться від USB порту комп'ютера, що обмежує теоретично можливий струм при вимірюванні до значення 100-200 мА. Це свою чергу не дозволяє врахувати деякі параметри транзисторів, оскільки необхідно проводити вимірювання в зоні сильної інжекції біполярного транзистора. Другим недоліком є мала точність приладу, зокрема через використання 12-бітного АЦП. Такої розрядності АЦП достатньо для візуалізації характеристик в навчальних цілях, але є не достатньо для формування параметрів математичної моделі транзистора.

1.3 Висновки

В даному розділі було розглянуто два аналоги розроблюваному пристрою. І як бачимо найбільш сучасні аналоги можуть обмінюватися даними з персональним комп'ютером, або взагалі використовувати його як пристрій вводу-виводу. Очевидно, що від цього залежать габарити та вартість приладів. Також важливим є обмежена функціональність приведених приладів, оскільки вони отримують не всі характеристики транзисторів, що необхідні для отримання параметрів математичної моделі та не мають програмного алгоритму обчислення параметрів математичної моделі транзистора. Також лабораторний стенд LESO3 має не достатній максимально можливий струм вимірювання та малу точність вимірювання.

2 РОЗРОБКА АПАРАТНОЇ ЧАСТИНИ

Виконання поставленого в магістерській дисертації завдання потребувало значних схмотехнічних змін існуючого прототипу. Внаслідок цього було прийнято рішення не використовувати макетні плати як у існуючому прототипі, а спроектувати нову друковану плату фабричного зразка. Однією з причин такого рішення є перспектива використання даного пристрою в лабораторії навчального корпусу КПІ імені Ігоря Сікорського в навчальних та дослідницьких цілях, а отже пристрій повинен бути практичний в ремонті та заміні комплектуючих та відповідати певним стандартам. В наступних розділах розглянемо схмотехнічні та конструктивні зміни нового пристрою.

Незважаючи на значні схмотехнічні зміни нового пристрою, структурна схема залишилася такою ж і приведена на рисунку 2.1.

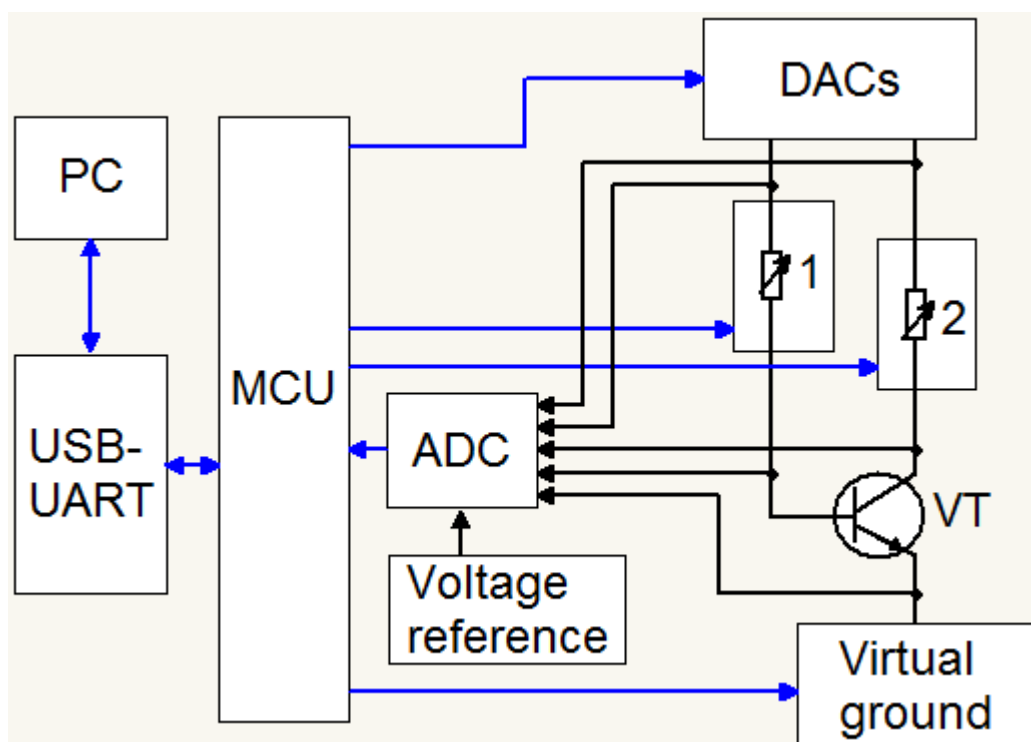


Рисунок 2.1 – Структурна схема пристрою: 1 – блок комутації обмежувального опору зажиму керування, 2 – блок комутації обмежувального опору основного зажиму, VT – досліджуваний компонент.

В даній структурній схемі показано підключення біполярного транзистора в ролі досліджуваного компоненту, де зажим керування (control probe) підключається до бази, основний зажим (power probe) підключається до колектора, а зажим віртуальної землі (virtual ground) підключається до емітера.

2.1 Розробка вузлів живлення

Для дослідження транзисторів різних типів провідності в попередньому прототипі пристрою розробленому в бакалаврській роботі використовувалось двополярне живлення з напругами +12В та -12В. Внаслідок вдосконалення принципу формування та вимірювання напруг відпала необхідність в двополярному живленні пристрою. Тому було вирішено використати імпульсний блок живлення потужністю 45 Вт з номінальною вихідною напругою 12 В та максимальним струмом 3,7 А, який приведений на рисунку 2.1.

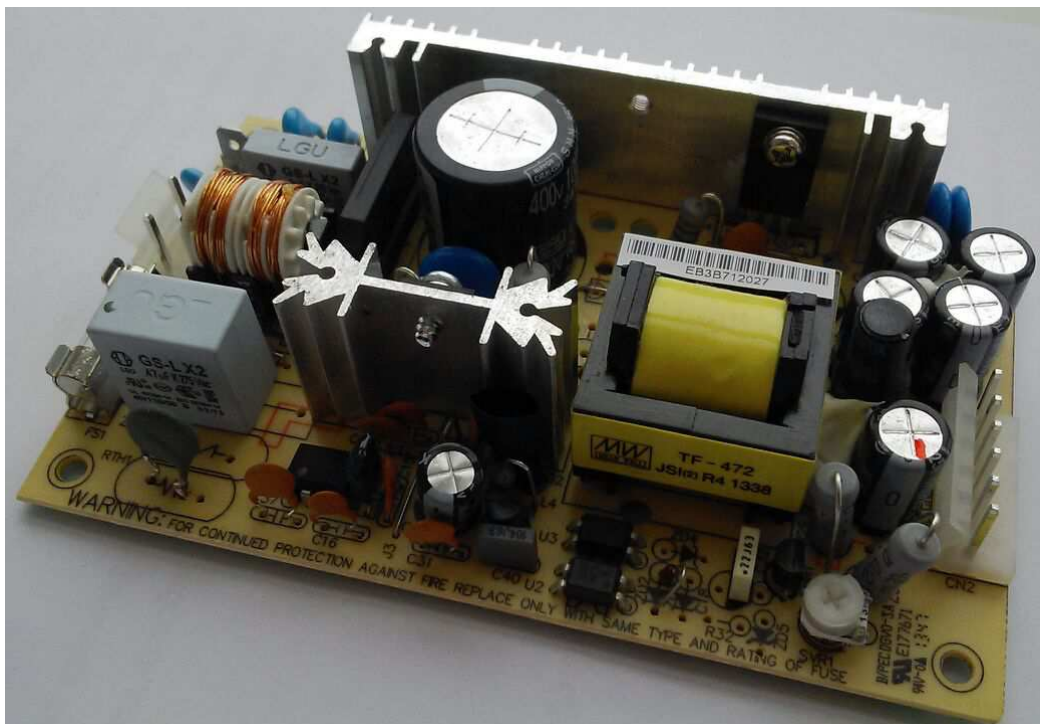


Рисунок 2.1 – Блок живлення

Даний блок живлення був обраний завдяки хорошим масо-габаритним параметрам та ціні.

Максимальний розмах напруги пульсацій вихідної напруги складає 100 мВ. Оскільки при формуванні від'ємних напруг між зажимами досліджуваного компоненту, зажим віртуальної землі зміщується на значення напруги рівної напрузі живлення, то необхідна попередня фільтрація напруги живлення перед подачею на клему віртуальної землі. Схема на яку покладено такі функції приведена на рисунку 2.2.

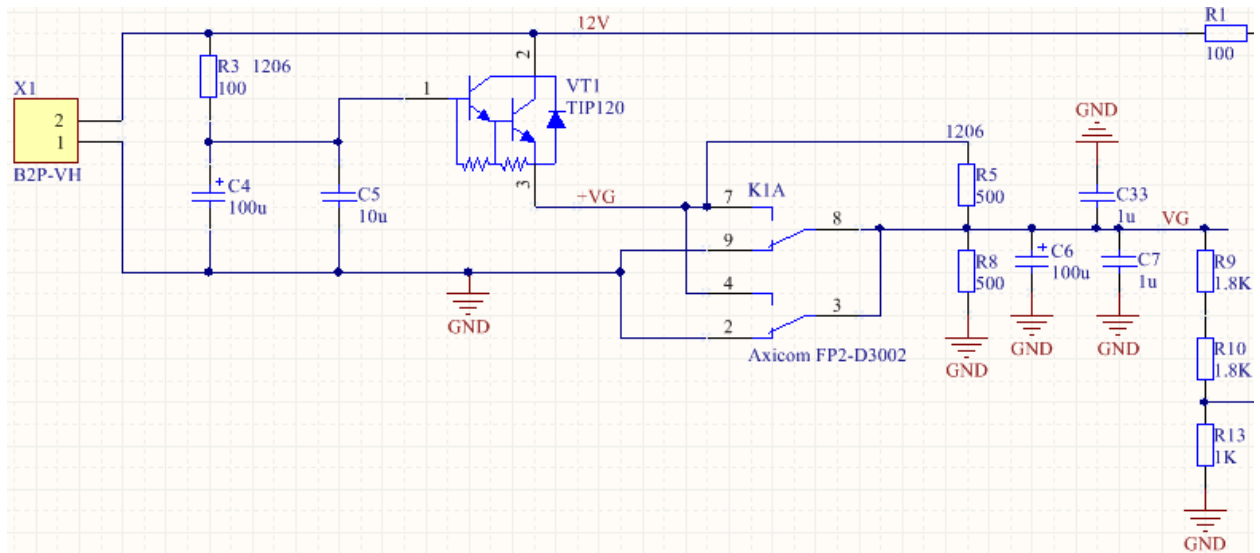


Рисунок 2.2 – Схема принципова фільтру та комутатора напруги віртуальної землі

Для живлення мікроконтролера необхідно створити додаткову гілку блоку живлення з вихідною напругою +5 В та струмом не більше 50мА. Це буде реалізовано за допомогою додаткового стабілізатора на інтегральній мікросхемі LM7805. Приведемо її схему ввімкнення на рисунку 2.3.

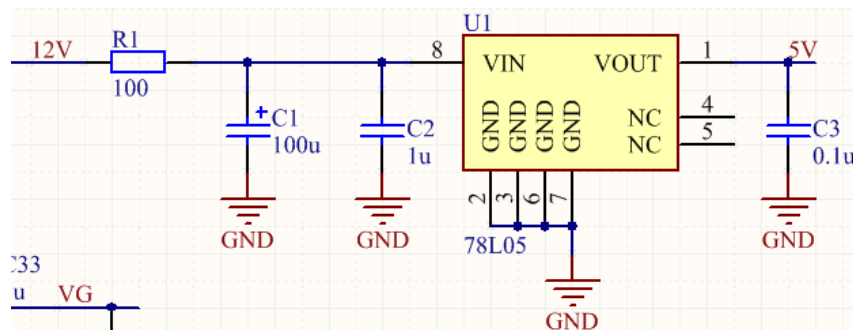


Рисунок 2.3 – Схема принципова додаткового вузла для формування напруги +5В

Схема ввімкнення даного стабілізатора є типовою і не потребує пояснення, за виключенням резистора 1, який слугує для формування фільтру низької частоти для вхідної напруги стабілізатора.

У новому пристрої використовується також інше джерело опорної напруги. Замість lm431, точність якого була в межах 2%, використовується ref5025, точність якого складає 0,1% по вихідній напрузі. Схема ввімкнення мікросхеми приведена на рисунку 2.4.

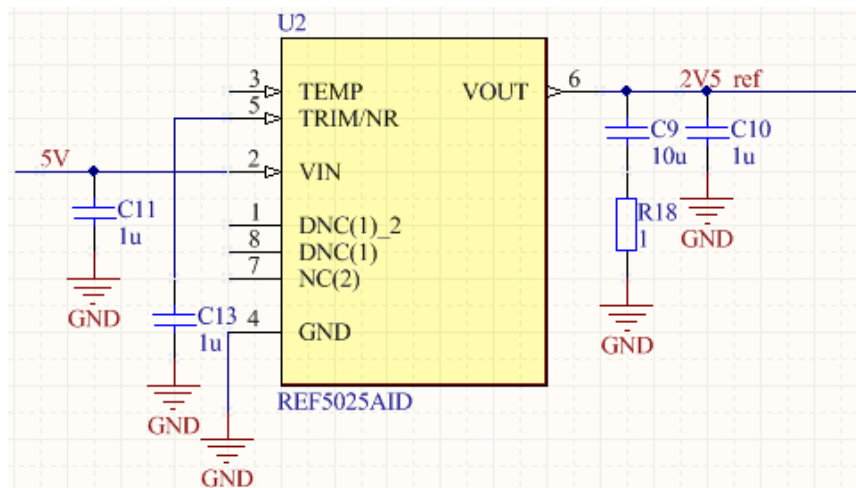


Рисунок 2.4 – Схема джерела опорної напруги

2.2 Вибір мікроконтролера та схеми керування реле та USB-UART конвертера

Мікроконтролер необхідний для керування усіма вузлами приладу та керування процесом вимірювання. Через рішення у новому пристрої використати зовнішні АЦП та ЦАП, мікроконтролер повинен мати SPI інтерфейс. Мікроконтролер Atmega8a задовільняє усі поставлені вимоги.

Приведемо вимоги які пред'являються до мікроконтролера в даній розробці:

- наявність послідовного інтерфейсу UART
- наявність послідовного інтерфейсу SPI для обміну даними з АЦП та ЦАП.
- 11 входів/виходів загального призначення, для керування АЦП, ЦАП та комутації реле.
- Тактова частота вище 5 МГц

Для зв'язку мікроконтролера пристрою з комп'ютером через USB порт буде використаний той же USB-UART конвертер, що і в бакалаврській роботі. А саме USB-UART конвертер на основі спеціалізованої інтегральної мікросхеми FT232RL. Схему показано на рисунку 2.5.

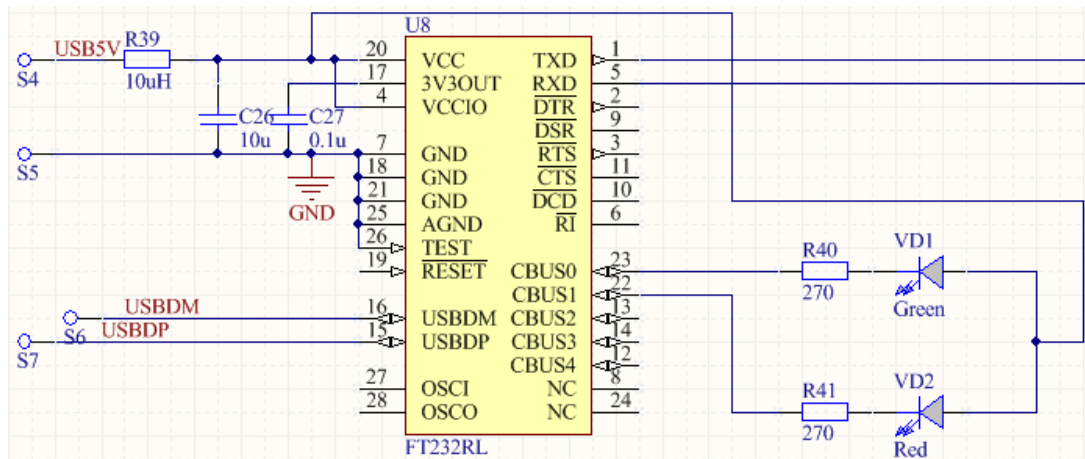


Рисунок 2.5 – Мікросхема FT323RL та схема електрична принципова USB-UART конвертера на її основі

В існуючому прототипі для керування реле використовувались транзистори, але оскільки пристрій має 5 реле, то доцільніше використати спеціалізовану мікросхему, яка зможе керувати усіма реле одночасно. Вимоги задовільняє мікросхема драйвер ULN2003. Вона не потребує зовнішніх компонентів та може керувати до 8 реле одночасно. Схему керування реле приведено на рисунку 2.6.

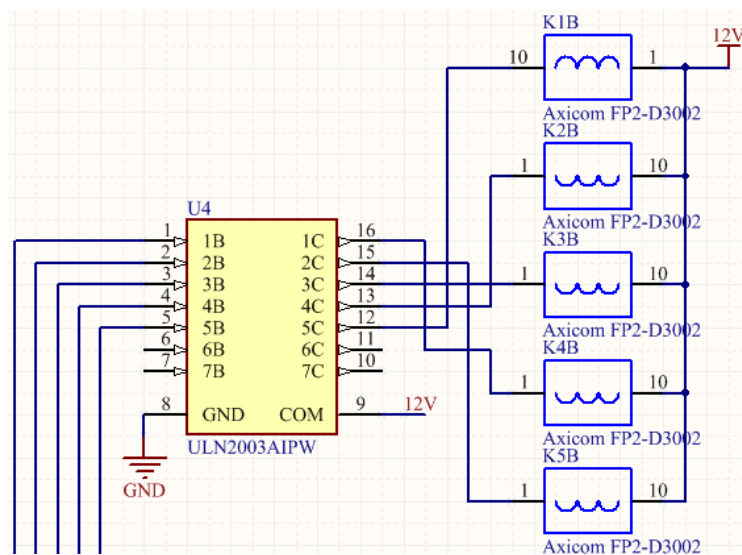


Рисунок 2.6 – Схема керування реле за допомогою мікросхеми-драйвера ULN2003

2.3 Схема формування тестових напруг

Для можливості проведення вимірювання компоненту необхідна схема формування тестових напруг, які будуть подаватися на відповідні електроди компоненту через обмежувальні резистори. В бакалаврській роботі тестові напруги формувались шляхом фільтрації ШІМ сигналу, оскільки була необхідність формування тестових напруг позитивної та негативної полярності. В магістерській дисертації розроблений новий принцип роботи пристрою, який не вимагає формування від'ємних тестових напруг, тож в схемі присутні лише позитивні напруги, а негативні напруги між зажимами досліджуваного компоненту формуються шляхом зміщення клемі віртуальної землі на постійний потенціал. Цей метод дозволив використати однополярний блок живлення описаний в пункті 2.1, а також дозволив використати ЦАП для формування тестових напруг. Схему формування тестових напруг приведено на рисунку 2.7. Слід сказати про недолік цього рішення, яке полягає в необхідності калібровки дільників напруг вимірюваного сигналу, оскільки розузгодження коефіцієнтів ділення подільників призводить до похибки в вимірюваннях. Було розроблено автоматичний алгоритм калібровки дільників, що не вимагає використання зовнішніх еталонів та вимірювальних приладів.

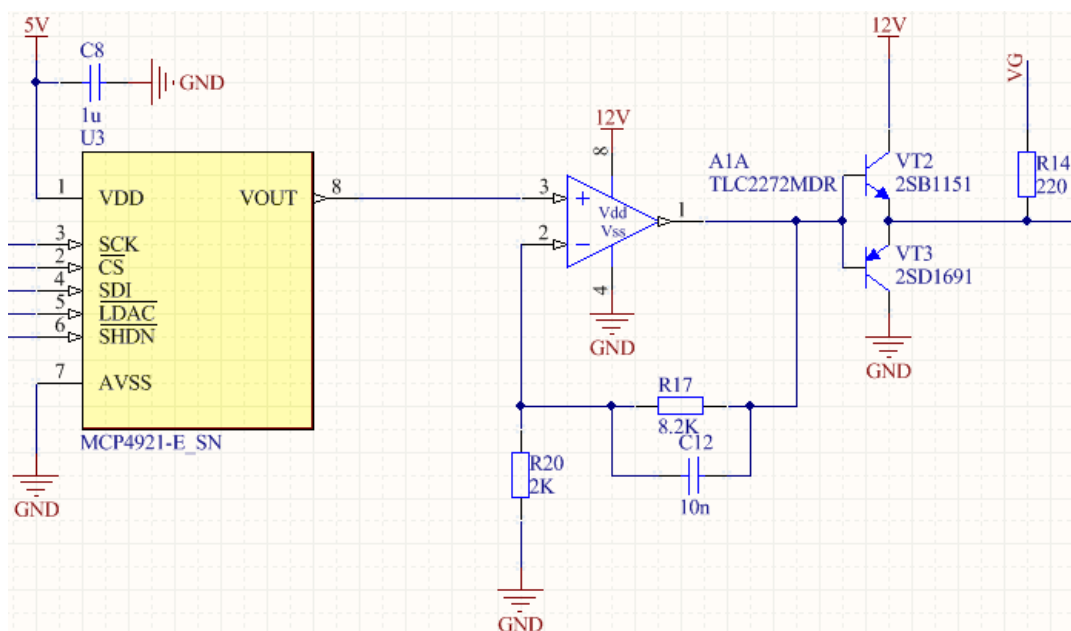


Рисунок 2.7 – Схема формування тестових напруг

Мікросхема U3 представляє собою 12-ти бітний ЦАП, що формують напруги в діапазоні від 0 до 2,5 В. Для розширення діапазону напруг використаний підсилювач на операційному підсилювачі А1. Резистори R17-R20 задають коефіцієнт підсилення. Для зменшення вихідного опору схеми використані емітерні повторювачі на двох комплементарних транзисторах. Резистор R14 забезпечує незначну підтяжку до зажиму віртуальної землі, що допомагає реалізувати автоматичну калібровку дільників напруг.

2.4 Схема вимірювання.

Схема вимірювання необхідна для зняття значень напруг на електродах тестового компоненту, та струмів через них. Значення струмів вираховуються через різницю напруг, що спадають на обмежувальних резисторах за законом Ома. Обмежувальні резистори включені послідовно з електродами тестового компоненту.

Схема вимірювання розроблена в магістерській дисертації також відрізняється від розробленої в бакалаврській роботі. Оскільки тепер вимірювані напруги завжди позитивні, то відпадає необхідність в додатковому інвертуванні вимірюваної напруги перед подачею на АЦП. Були добавлені повторювачі напруги на операційних підсилювачах для зменшення впливу шунтування тестових зажимів дільниками напруг, а також забезпечення низького опору джерела сигналу що подається на вхід АЦП шляхом зменшення номіналів резисторів дільників напруг. Схема вимірювання без АЦП та схема комутації обмежувального опору приведена на рисунку 2.8.

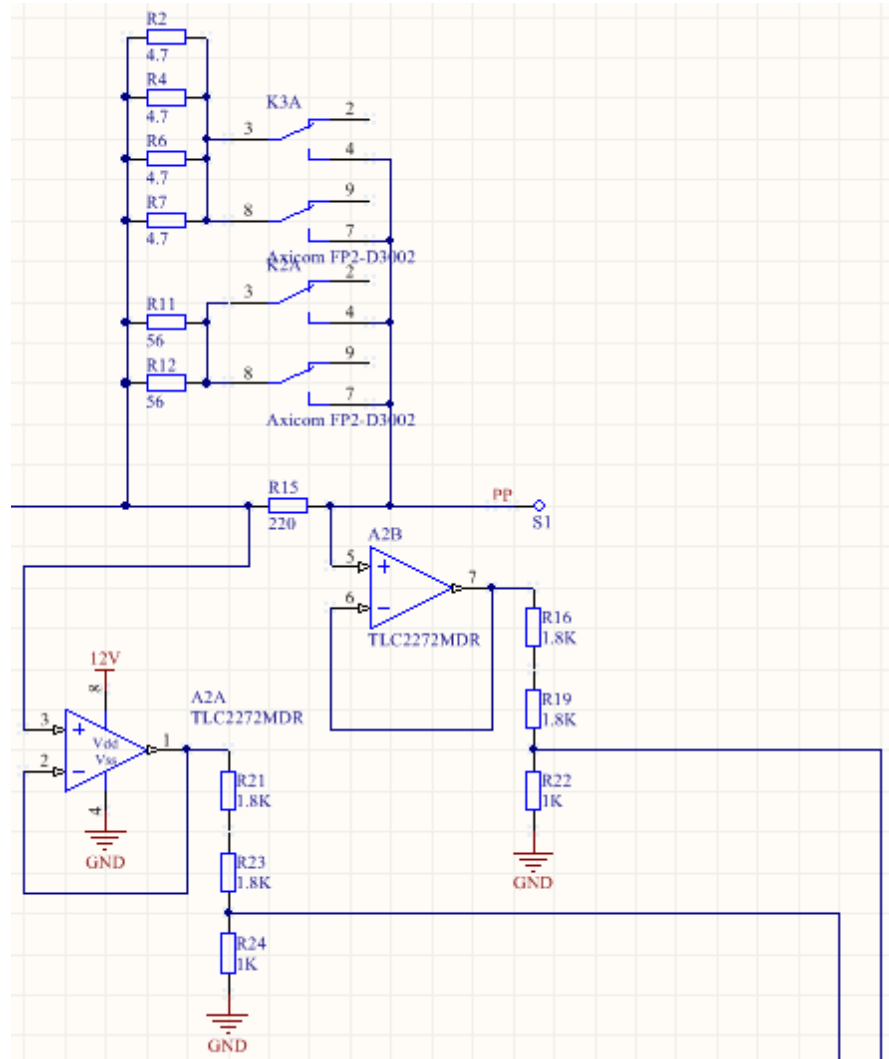


Рисунок 2.8 – Схема вимірювання

На рисунку 2.9 приведена схема підключення та обв'язка АЦП.

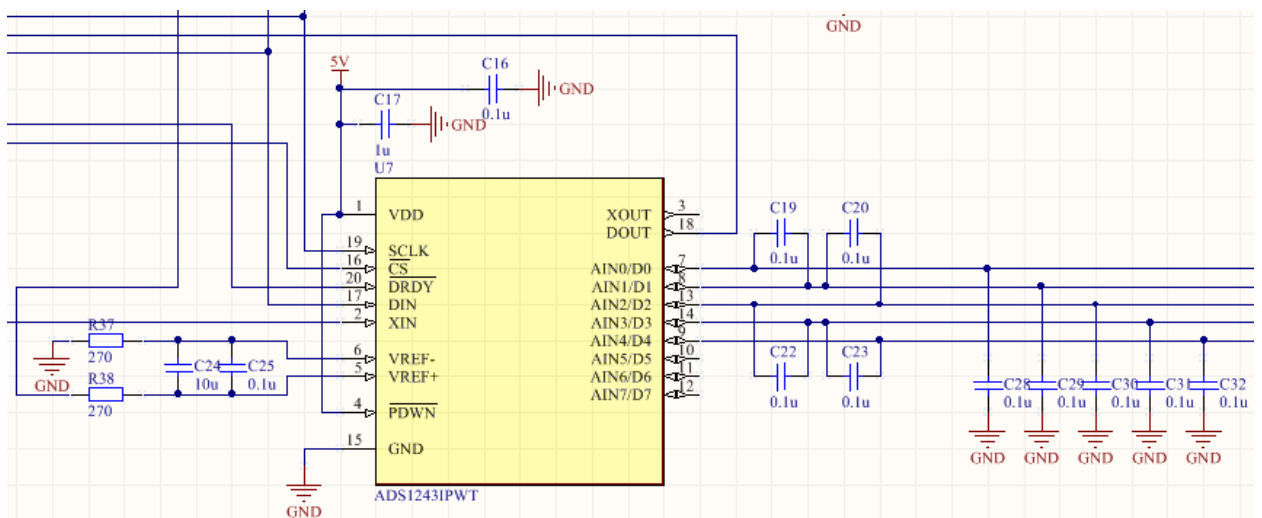


Рисунок 2.9 – Схема підключення та обв'язка АЦП

2.5 Спроектований пристрій

На рисунку 2.11 показано зображення з екрану спроектованої друкованої плати в середовищі Altium Designer.

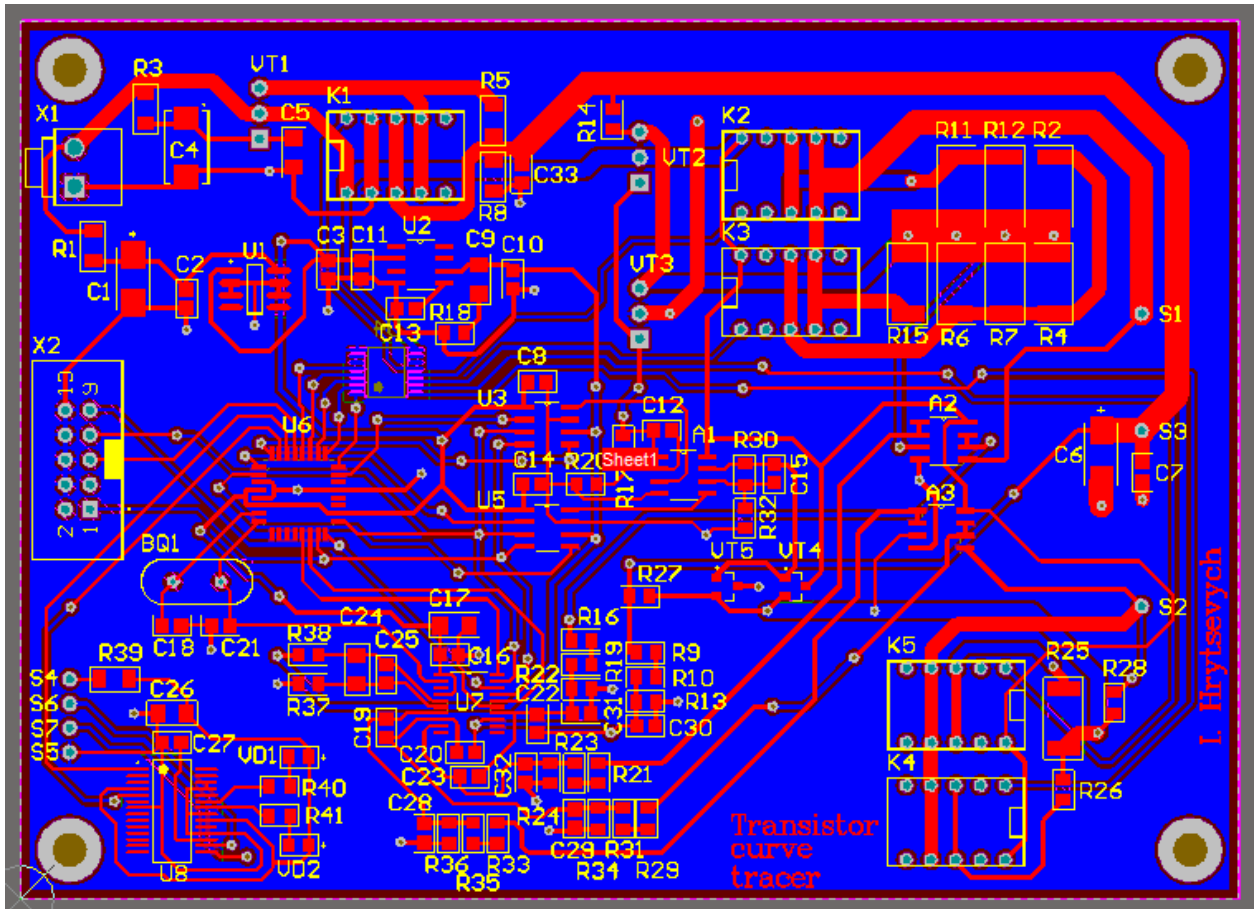


Рисунок 2.11 – Зображення друкованої плати пристрою в середовищі Altium Designer

На рисунку 2.12, рисунку 2.13 показана виготовлена друкована плата пристрою.

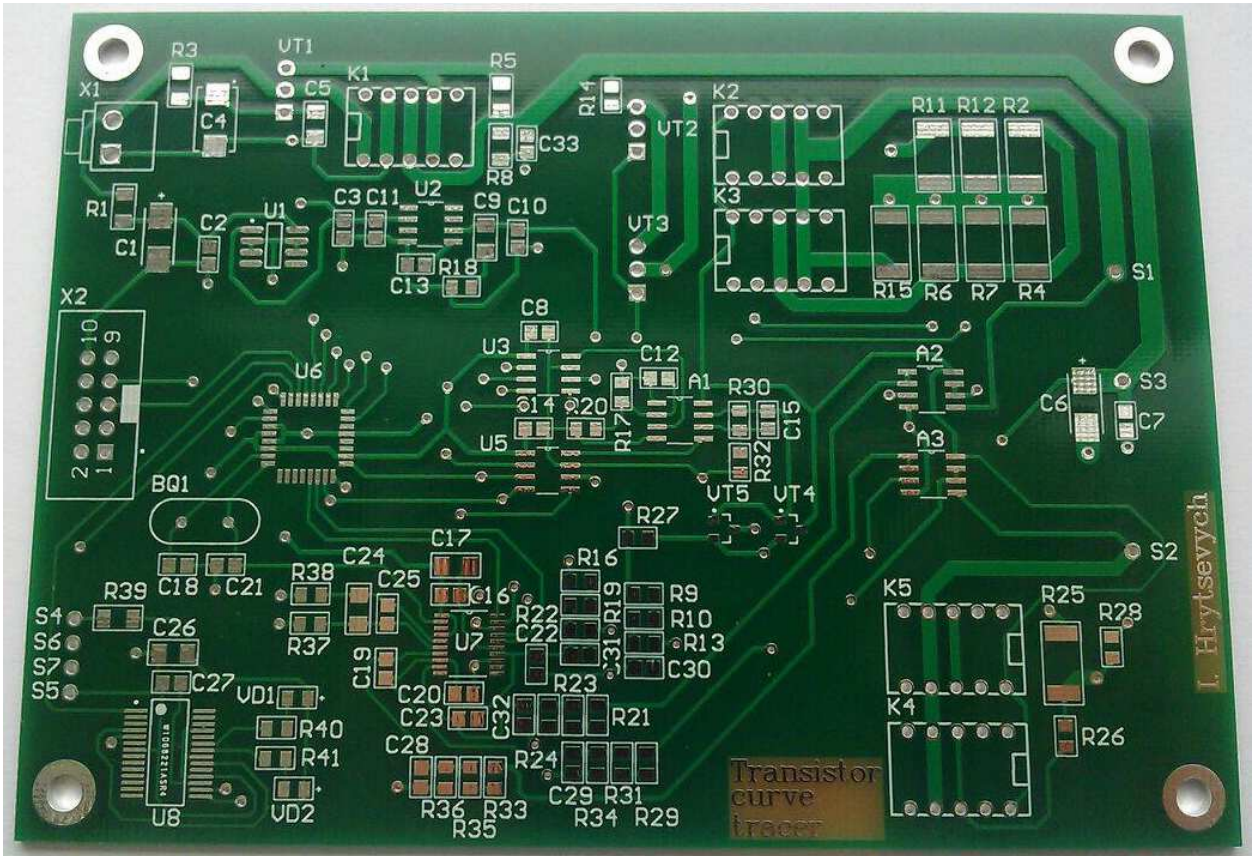


Рисунок 2.12 – Виготовлена друкована плата пристрою (вид зверху)

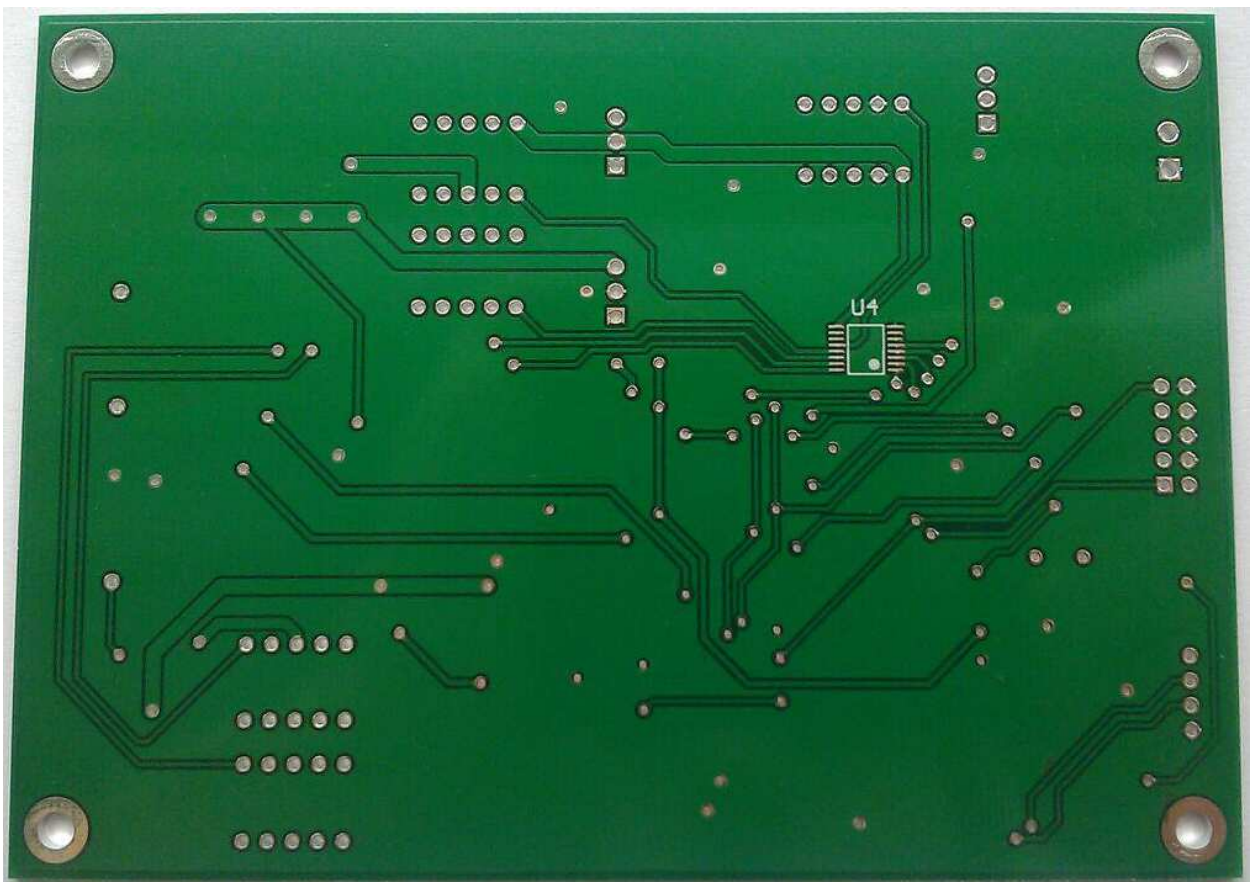


Рисунок 2.13 – Виготовлена друкована плата пристрою (вид знизу)

На рисунку 2.14 показано готовий пристрій без корпусу.

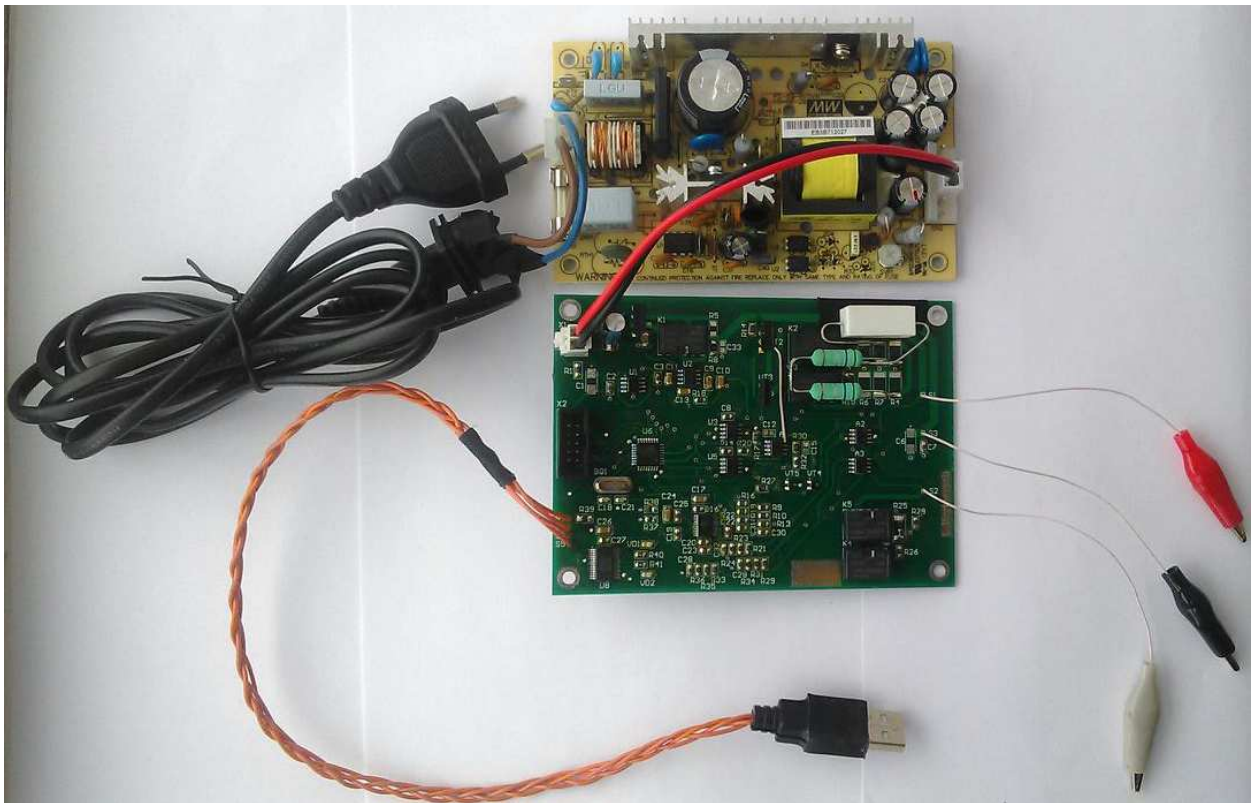


Рисунок 2.14 – Пристрій перед встановленням в корпус

Пристрій має три зажими для підключення до досліджуваного компоненту. Серед яких зажим керуючого електроду, зажим основного електроду і зажим віртуальної землі.

Приведемо основні характеристики спроектованого пристрою:

Діапазон зміни тестових напруг – 0... 11 В.

Діапазон струмів основного зажиму – 0... 3 А.

Точність вимірювання напруги контрольного зажиму – 1 мВ.

Крок перестройки напруги – 3 мВ.

Напруга живлення – 220В.

Струм живлення – до 300 мА.

3 ПРОГРАМА КЕРУВАННЯ ТА ОБРАХУНКУ ПАРАМЕТРІВ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

3.1 Розробка програми керування пристроєм з графічним інтерфейсом

В магістерській дисертації програма керування пристроєм було суттєво вдосконалена. Перш за все була реалізована можливість повністю керувати діапазонами вимірювань, оскільки в старій версії програми була можливість задавати лише максимальне значення тестової напруги від якої будується характеристика. Також не було можливості задавати мінімальне значення параметру побудови кривої сімейства характеристик. Вікно програми керування приведено на рисунку 3.1.

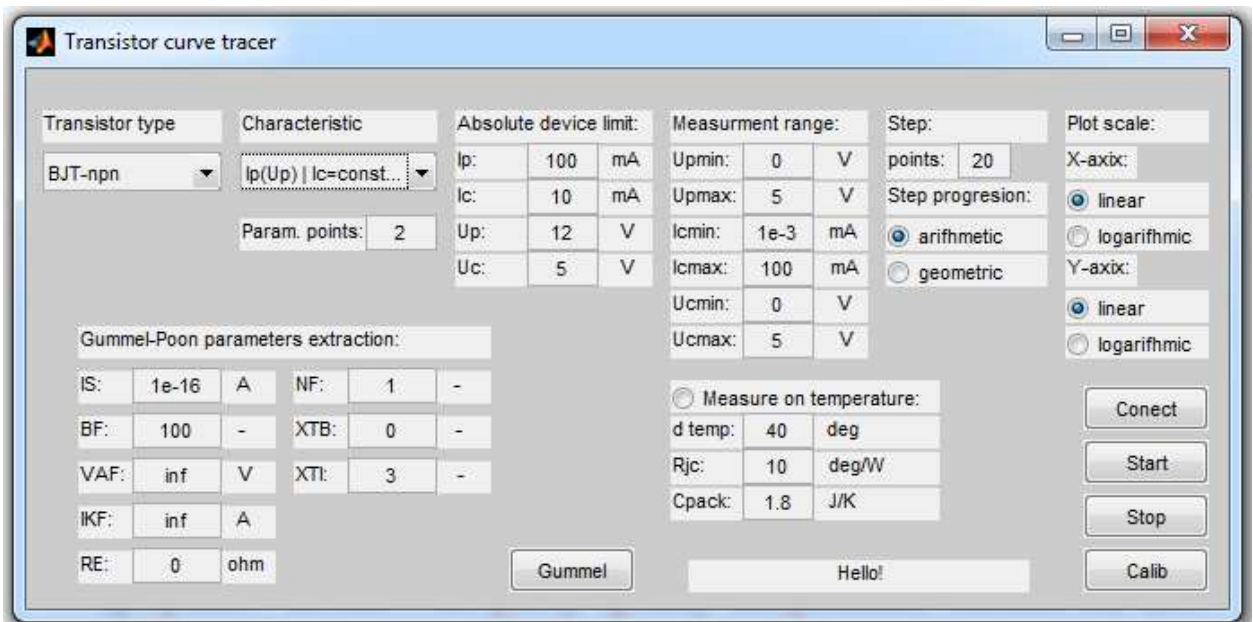


Рисунок 3.1 – Вікно програми керування пристроєм та обрахунку параметрів моделі

Корисним нововведенням також є можливість задавати лінійний, або логарифмічний масштаби кожної осі окремо для побудови графіків. Це є корисним в першу чергу для отримання графіків Гумеля-Пуна, які будуються в логарифмічному масштабі по осі ОУ. Також графік залежності коефіцієнту підсилення струму бази наочніше будувати в логарифмічному масштабі по осі ОХ. Можливість керувати масштабами осей графіку реалізована за допомогою

радіокнопок в правому верхньому куті вікна програми. Покажемо приклад зміни масштабу осі графіку для реальної задачі. Виміряємо залежність колекторного струму від напруги база-емітер транзистора КТ31Б при напрузі колектор-емітер рівній 2 В. Результат приведено на рисунку 3.2.

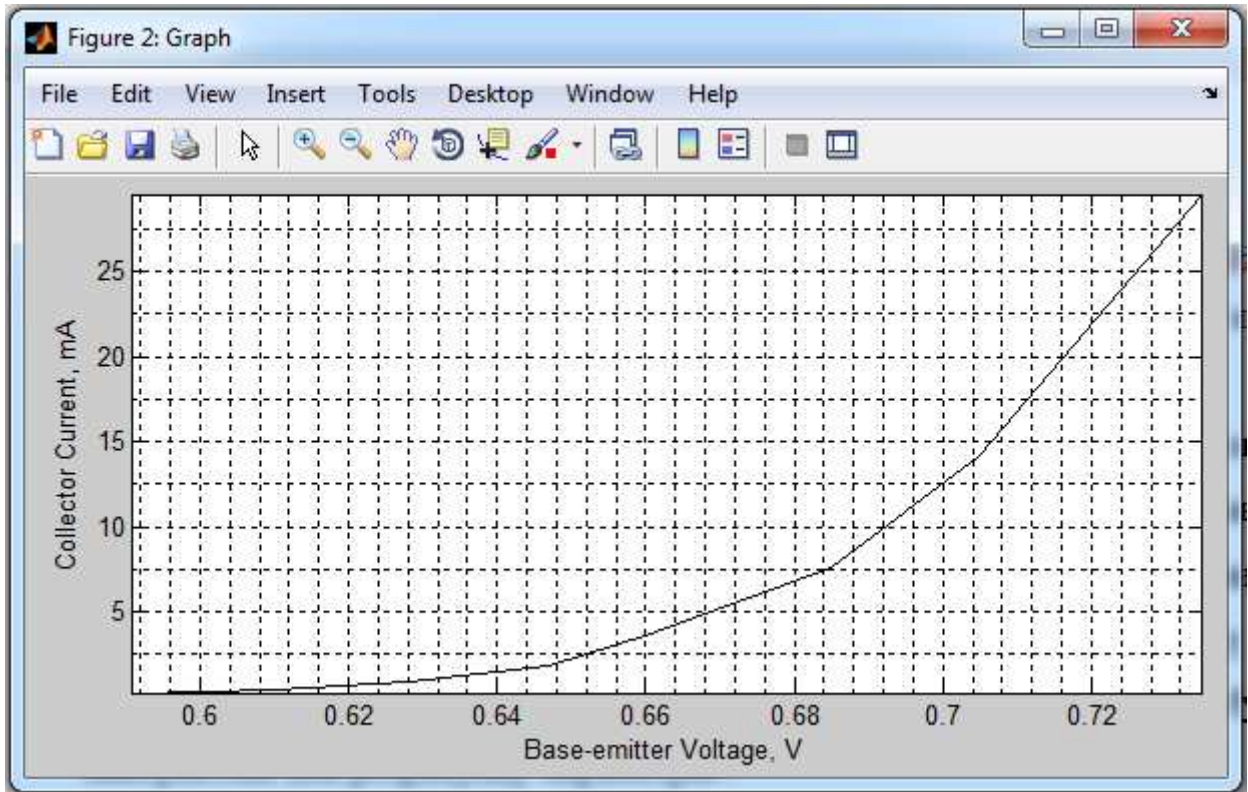


Рисунок 3.2 – Залежність колекторного струму від напруги база-емітер транзистора КТ31Б в лінійному масштабі

Залежність має експоненційний характер і на ній важко побачити різні режими роботи транзистора. Проте якщо перейти до логарифмічного масштабу по осі ОУ (рисунок 3.3), то отримаємо графік Гумеля-Пуна на якому тепер можна помітити слабкий злам експоненційної характеристики. Ця точка сигналізує про перехід транзистора в зону сильної інжекції, де починає діяти ефект Кірка та починає впливати опір емітера транзистора.

Додана можливість поділу діапазону вимірювань на масив значень в геометричній прогресії. Це корисно, оскільки зазвичай значення струму бази та колектора змінюються на декілька порядків при вимірюванні.

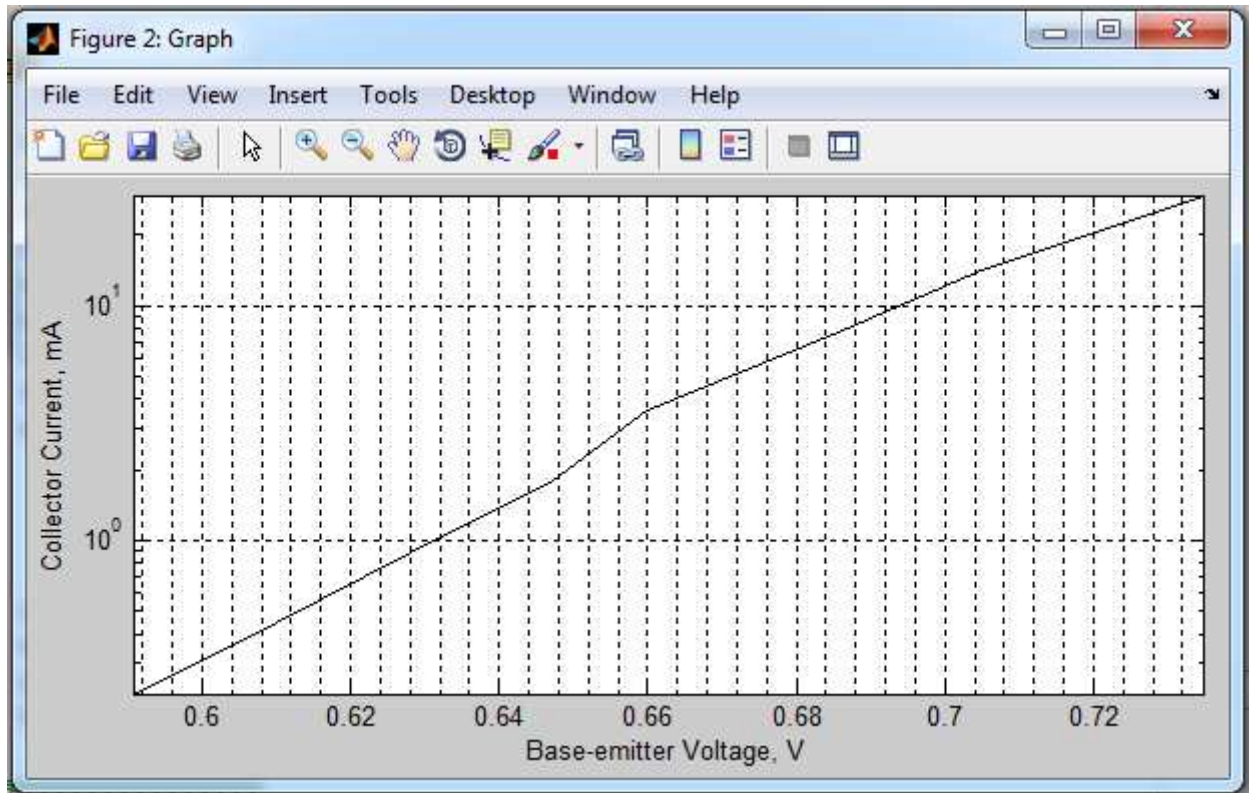


Рисунок 3.3 – Залежність колекторного струму від напруги база-емітер транзистора КТ31Б в логарифмічному масштабі по осі ОУ

Добавлена можливість вимірювати температурні характеристики, про що детальніше описано в розділі 3.4.

Було інтегровано алгоритм екстракції основних параметрів моделі Гумеля-Пуна для біполярного транзистора у вікно програми. Таким чином пристрій дозволяє не лише вимірювати і відображати характеристики в графічному вигляді, а й безпосередньо отримувати основні параметри математичної моделі для САПР. Алгоритм реалізований так, що програма спочатку вимірює необхідні для отримання параметрів характеристики, а потім обраховує параметри з цих експериментальних даних. Метод обрахунку параметрів пов'язаний з вирішенням трансцендентних рівнянь, що рахуються численими методами, а саме методом бісекцій. Метод обрахунку був інтегрований в програму керування пристроєм. Для вимірювання параметрів необхідно натиснути кнопку "Gummel".

Перший етап налаштування – вибір досліджуваного компоненту, показано на рисунку 3.4. Другий етап – вибір досліджуваної характеристики,

показано на рисунку 3.5.

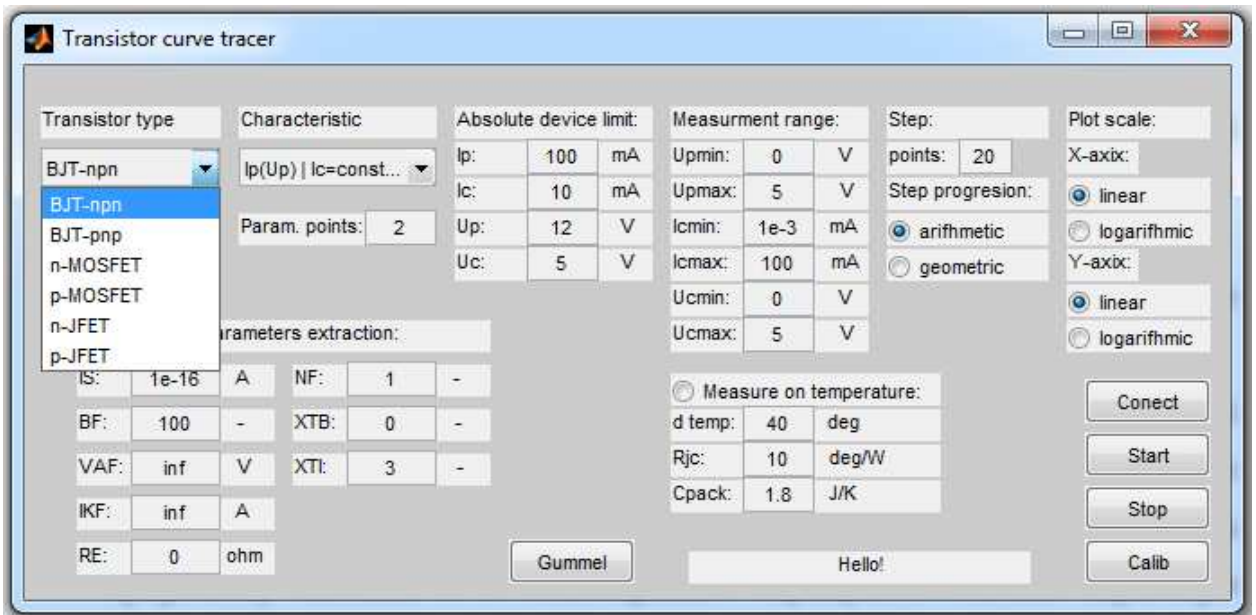


Рисунок 3.4 – Вибір типу досліджуваного компонента

В старій версії програми необхідно було задавати вручну значення обмежувальних опорів, що з'єднані послідовно з електродами досліджуваного компонента і завдяки яким вимірювались струми через електроди досліджуваного компонента. Нова версія програми автоматично та адаптивно обирає значення обмежувального опору залежно від струму які протікають через електроди в даний момент вимірювання.

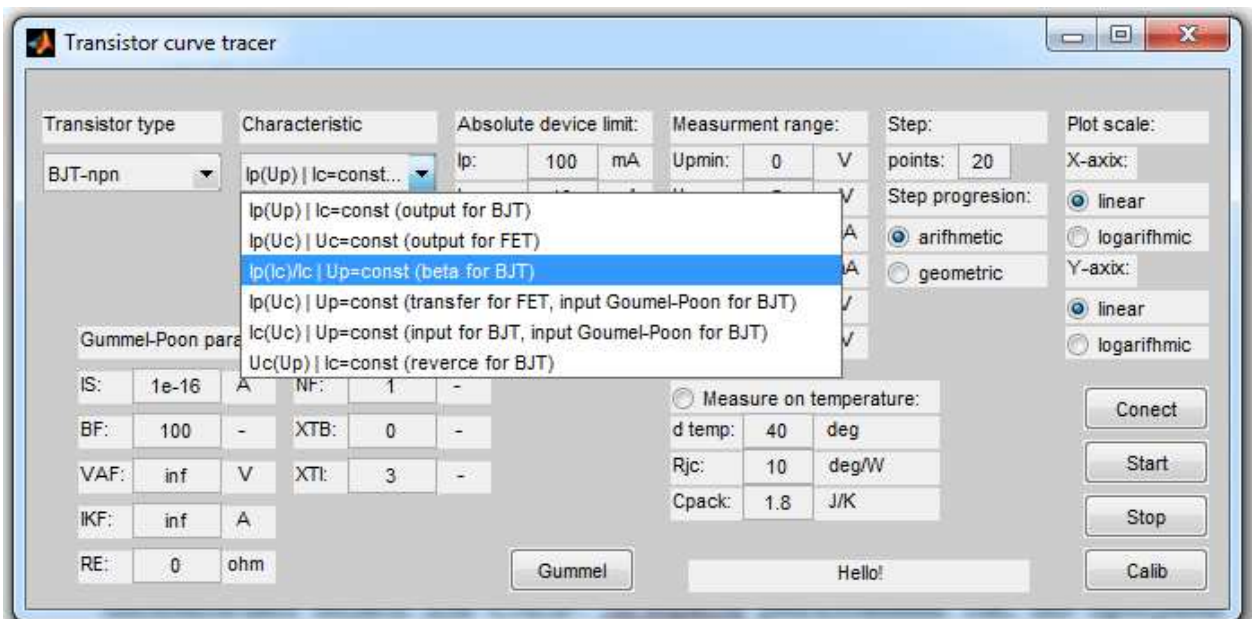


Рисунок 3.5 – Вибір досліджуваної характеристики

В таблиці 3.1 приведені команди керування пристроєм.

Таблиця 3.1 – Опис команд керування пристроєм що генеруються програмою

| Команда керування в десятковій формі | Опис команди |
|--------------------------------------|--|
| 0 | Зарезервовано |
| 1 | Запит на з'єднання. Очікується відповідь у вигляді «ехо» (код 1), що свідчить про наявність підключеного пристрою. |
| 2 | Записати значення регістру ЦАП каналу CP (control probe) |
| 3 | Записати значення регістру ЦАП каналу PP (power probe) |
| 4 | Початок вимірювання АЦП. Повертає результат у вигляді 5-ти 24-бітних регістрів. |
| 5 | Підтягнути зажим віртуальної землі (VG) до аналогової землі |
| 6 | Підтягнути зажим віртуальної землі (VG) до шини живлення |
| 7 | Встановити значення обмежувального опору каналу CP рівним 220 кОм. |
| 8 | Встановити значення обмежувального опору каналу CP рівним 6,8 кОм. |
| 9 | Встановити значення обмежувального опору каналу CP рівним 220 Ом. |
| 10 | Встановити значення обмежувального опору каналу PP рівним 220 Ом. |
| 11 | Встановити значення обмежувального опору каналу PP рівним 12 Ом. |
| 12 | Встановити значення обмежувального опору каналу PP рівним 0.6 Ом. |

Приведемо модель Гумеля-Пуна біполярного транзистора на рисунку 3.6.

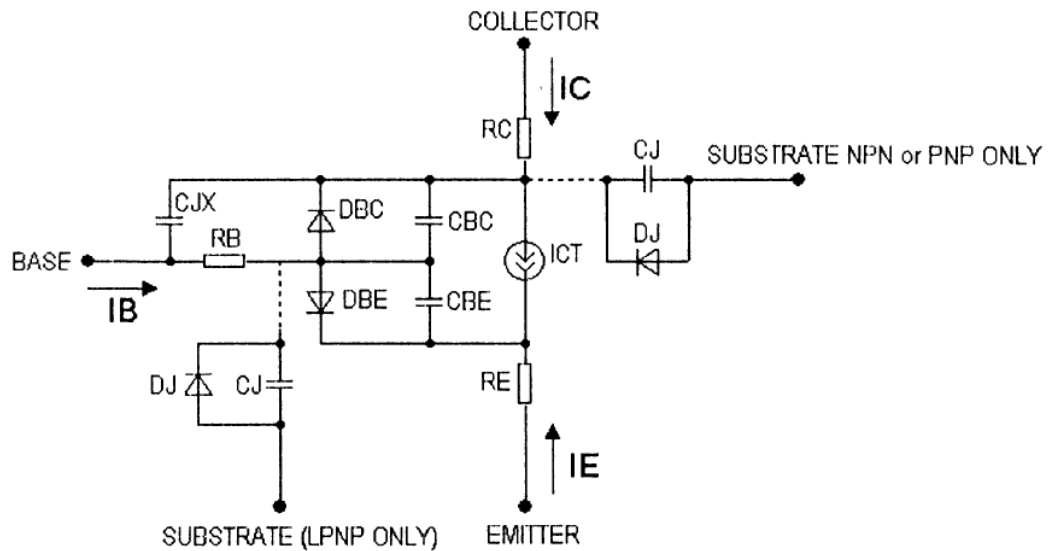


Рисунок 3.6 – Модель Гумеля-Пуна біполярного транзистора

Струм бази моделі транзистора визначається як

$$I_B = IS \cdot \frac{\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NF \cdot V_T}\right) - 1}{BF} + ISE \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NE \cdot V_T}\right) - 1 \right)$$

Струм колектора моделі транзистора визначається як

$$I_C = IS \cdot \frac{\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NF \cdot V_T}\right)}{QB}, \text{ де}$$

$$QB = \frac{Q1 \cdot (1 + \sqrt{1 + 4 \cdot Q2})}{2},$$

$$Q1 = \frac{1}{1 + \frac{V_{CE}}{VAF}}, \quad Q2 = IS \cdot \frac{\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NF \cdot V_T}\right) - 1}{IKF}, \text{ де}$$

а також

V_{BE} – напруга база-емітер, V_T – термальна напруга, V_{CE} – напруга колектор-емітер.

З даних виразів виділяємо ключові параметри моделі Гумеля-Пуна:

IS — струм насичення при 27°C .

BF — ідеальний коефіцієнт підсилення струму бази при 27°C .

NF — коефіцієнт емісії (неідеальності) для нормального режиму.

VAF — напруга Ерлі для нормального режиму.

IKF — струм початку спаду залежності від струму колектора.

RE — опір емітера.

Також при зміні температура на роботу транзистора суттєво впливають такі параметри як:

XTB — Температурний коефіцієнт параметрів BF і BR

XTI — Температурний коефіцієнт параметра IS

Ці параметри можна знайти в бібліотеці САПР та редагувати їх (рисунок 3.7).

Source: Global library located at C:\MC9\library\MPBJT.LBR

| | | | | | |
|-------|-------------------|-----|-------------------|-----|-------------------|
| LEVEL | 1 | AF | 1 | BF | 199.996209903524 |
| BR | 99.671345772217m | CJC | 5p | CJE | 2p |
| CJS | 0 | EG | 1.11 | FC | 500m |
| IKF | 559.818760296133m | IKR | 999.999675660315m | IRB | 0 |
| IS | 9.999956070726f | ISC | 404.194992780472f | ISE | 972.249942004551f |
| ISS | 0 | ITF | 10m | KF | 0 |
| MJC | 500m | MJE | 500m | MJS | 0 |
| NC | 2.000000001175 | NE | 1.562677837831 | NF | 1.001625491959 |
| NK | 500m | NR | 1 | NS | 1 |

Рисунок 3.7 – Параметри транзистора 2N222A в моделі САПР.

3.2 Дослідження розбіжності параметрів транзисторів. Алгоритм екстракції параметрів з експериментальних даних

Оцінимо розбіжність параметрів транзисторів одного типу. Для експерименту було взято 7 транзисторів КТ315Б (рисунок 3.8).

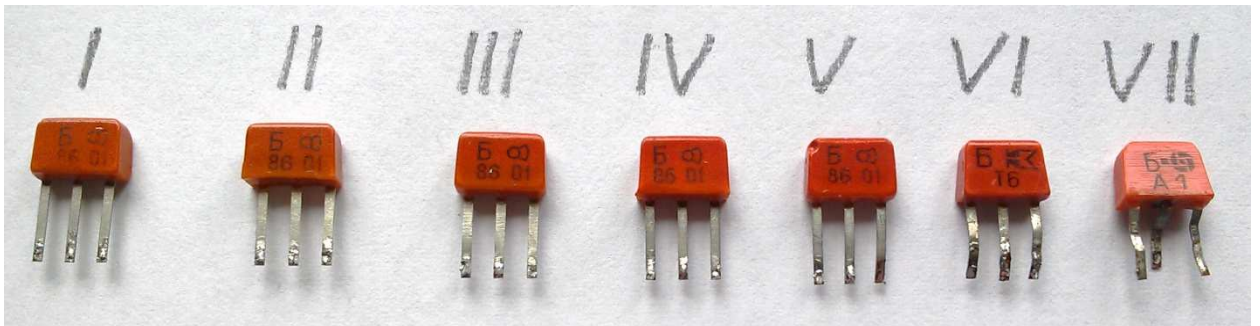


Рисунок 3.8 – Транзистори типу КТ315Б взяті для дослідження

Розглянемо роботу транзистора в прямому активному режимі. Для цього виберемо струми, при яких будемо проводити вимірювання. Для отримання характеристики в широкому діапазоні струмів колектора кожна наступна точка вимірювання буде мати подвоєний струм колектора відносно попередньої. Проводимо вимірювання для першого транзистора і вносимо результати до таблиці 3.2 та 3.3. Алгоритм розрахунку параметрів моделі транзистора буде показаний на прикладі розрахунку для першого транзистора.

Таблиця 3.2 – Експериментальні робочі точки першого транзистора (залежність струмів бази та колектора від напруги база-емітер)

| | | | | | | | | |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| Напруга база-емітер V_{BE} , мВ | 579 | 597 | 615 | 632 | 648 | 676 | 694 | 721 |
| Струм бази I_B , мкА | 1,23 | 2,16 | 3,8 | 6,82 | 12 | 25 | 45 | 96 |
| Струм колектора I_C , мА | 0,22 | 0,44 | 0,89 | 1,78 | 3,56 | 7,6 | 13,8 | 27,9 |

В таблиці 3.3 наведені експериментальні залежності струмів колектора від напруги колектор-емітер.

Таблиця 3.3 – Експериментальні робочі точки першого транзистора (залежність струму колектора від напруги колектор-емітер в активному режимі)

| | | |
|--------------------------------------|------|------|
| Напруга колектор-емітер V_{CE} , В | 1,86 | 2,86 |
| Струм колектора I_C , мА | 5,72 | 5,89 |

Для забезпечення умови активного режиму було взято напруги колектор-емітер більше напруги насичення, яка зазвичай має значення 0,1 – 1 В.

Побудуємо залежності таблиці 3.2 в напівлогарифмічному масштабі (Графік Гумеля), який використовується для розрахунку параметрів моделі [16, 17]. Результат показано на рисунку 3.9.

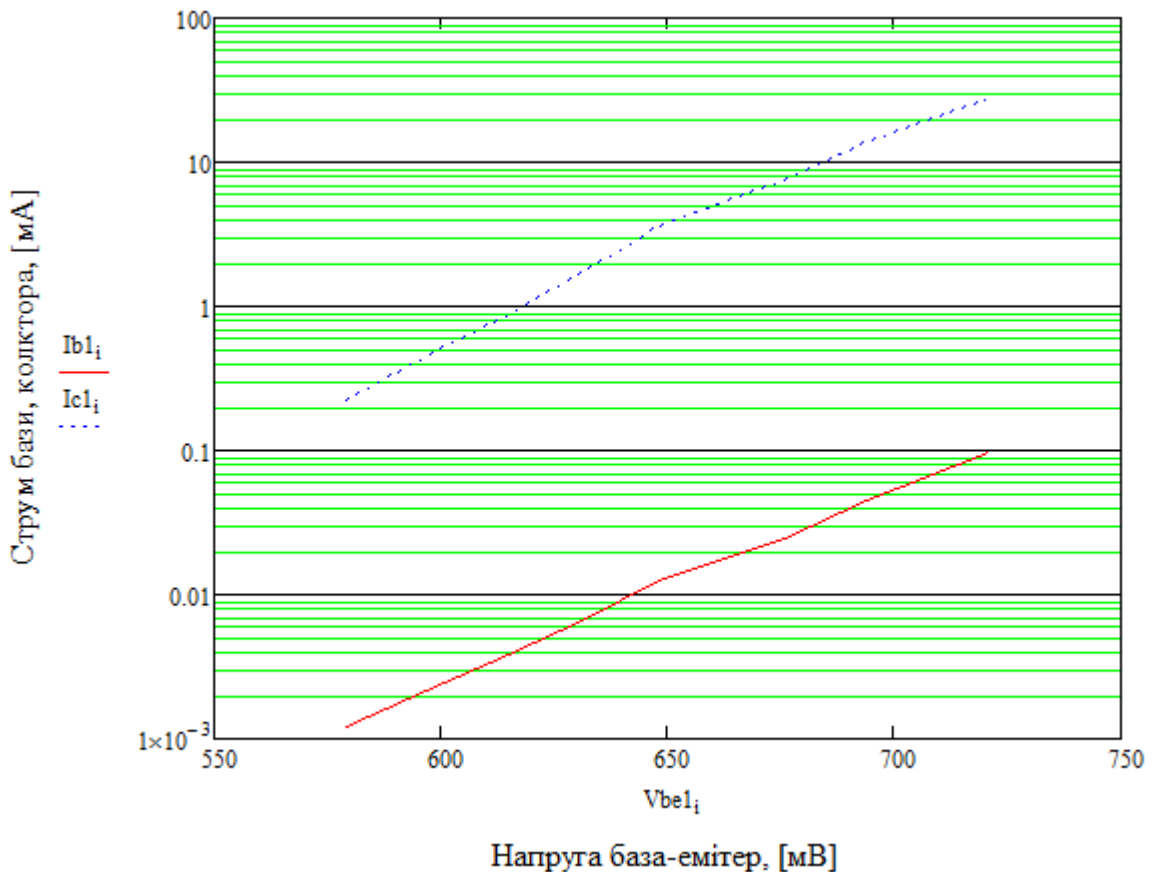


Рисунок 3.9 – Графік Гумеля побудований по експериментальним даним для першого транзистора

Рівняння, що описують модель Гумеля-Пуна мають багато невідомих параметрів. В результаті цього пряме їх знаходження пов'язане з рішенням системи трансцендентних рівнянь що є складним завданням та вимагає значних ресурсів комп'ютера. Однак якщо розглянути фізичні особливості характеристик транзистора, то можна помітити, що вони мають ділянки, на яких деякі параметри практично не впливають на роботу транзистора. Тому аналітичний вигляд залежності параметрів на цих ділянках характеристики

спрощуються, що дозволяє їх легше розрахувати, а потім використовувати їх на інших ділянках характеристики. Це основна ідея для алгоритму, що буде використаний для екстракції параметрів.

Для екстракції основних параметрів моделі транзистора необхідно 5 експериментальних точок з графіку Гумеля. Обираємо 5 таких точок, що включають режими слабкої та сильної інжекції (таблиця 3.4). А також необхідно дві точки вихідної характеристики (таблиця 3.5)

Таблиця 3.4 – Експериментальні дані необхідні для екстракції параметрів IS, NF, RE, BF, IKF

| Точка № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---------------|---------|---------|-------|-------|-------|
| V_{BE} , мВ | 579 | 597 | 648 | 694 | 721 |
| I_B , мА | 0.00123 | 0.00216 | 0.012 | 0.045 | 0.096 |
| I_C , мА | 0,22 | 0,44 | 3,56 | 13,8 | 27,9 |

Таблиця 3.5 – Експериментальні дані необхідні для екстракції параметру VAF

| Точка № | 1 | 2 |
|--------------|------|------|
| V_{CE} , В | 1,86 | 2,86 |
| I_C , мА | 5,72 | 5,89 |

Додамо значення термальної напруги, наближеного значення напруги відкритого переходу база-емітер та напругу колектор-емітер під час вимірювання відповідно.

$V_T = 25.85;$ %мВ
 $V_{be_on} = 700;$ %мВ
 $V_{ce_operation} = 2000;$ %мВ

Спершу знаходимо параметр VAF, оскільки його можна прямо виразити із даних табл. 3.5 використовуючи експериментальні точки 1, 2.

$$VAF = ((V_{ce(2)} - V_{ce(1)}) / (I_{c_fun_V_{ce(2)}} - I_{c_fun_V_{ce(1)}})) * 0.5 * (I_{c_fun_V_{ce(2)}} + I_{c_fun_V_{ce(1)}})$$

Далі можуть бути одночасно знайдені параметри IS та NF виключаючи параметр RE способом підстановки та нехтуючи параметром IKF в зоні слабкої інжекції.

Знаходимо струм насичення IS, для цього необхідно вирішити трансцендентне рівняння відносно IS. Використаємо ітераційний метод бісекцій [18]. Для рішення рівняння також необхідно задати початкове значення параметру IS. Задаємо значення рівне 10 пА, як типове значення.

В рівнянні будемо використовувати експериментальні точки 1 та 2, що знаходяться в зоні слабкої інжекції.

```
NF = 1;
IS = 1e-11;
ISm = [IS*0.8 IS IS*1.25]
for n1 = 1:1000
for n = 1:3
a1 = Vbe(1) - NF * VT * log( Ic(1) / ISm(n) );
a2 = Vbe(2) - NF * VT * log( Ic(2) / ISm(n) );
fIS(n) = a1 - ( Ic(1) * a2 / Ic(2) );
end
if(fIS(1)/fIS(2) > 0 & fIS(2)/fIS(3) > 0);
ISm = [ISm(1)*0.8 IS ISm(3)*1.25] ;
else
if(fIS(1)/fIS(2) < 0);
ISm = [ISm(1) 0.5*(ISm(1)+ISm(2)) ISm(2)] ;
else
ISm = [ISm(2) 0.5*(ISm(2)+ISm(3)) ISm(3)] ;
end
end
end
IS=ISm(2);
```

Тепер параметру IS присвоєно реальне значення параметру досліджуваного транзистора.

Далі в зоні сильної інжекції (експериментальні точки 4, 5) знаходимо параметр RE, виключаючи методом підстановки параметр IKF. Для рішення рівняння також необхідно задати початкове значення параметру RE. Задаємо значення рівне 0.1 Ом, як типове значення.

```
RE = 0.1;
REm = [RE*0.95 RE RE*1.05]
for n1 = 1:1000
for n = 1:3
```

```

a1 = (abs((2 * IS * exp( (Vbe(4) - REm(n)*Ic(4)) / NF / VT) / Ic(4) / q1s - 1)^2 - 1))^(-1);
a2 = (abs((2 * IS * exp( (Vbe(5) - REm(n)*Ic(5)) / NF / VT) / Ic(5) / q1s - 1)^2 - 1))^(-1);
b = 4 * IS * exp( (Vbe(4) - REm(n)*Ic(4)) / NF / VT);
fRE(n) = -REm(n) - ( NF * VT * log( a1 * b / a2 / 4 / IS) - Vbe(5) ) / Ic(5);
end
if(fRE(1)/fRE(2) > 0 & fRE(2)/fRE(3) > 0);
  REm = [REm(1)*0.95 RE REm(3)*1.05] ;
else
  if(fRE(1)/fRE(2) < 0);
    REm = [REm(1) 0.5*(REm(1)+REm(2)) REm(2)] ;
  else
    REm = [REm(2) 0.5*(REm(2)+REm(3)) REm(3)] ;
  end
end
end

RE = REm(2);

```

Тепер параметру RE присвоєно реальне значення параметру досліджуваного транзистора.

Знаходимо параметр IKF. Для цього необхідно використати одну з експериментальних точок, що були використані при знаходженні RE. Беремо точку 4.

```

a1 = (abs((2 * IS * exp( (Vbe(4) - RE*Ic(4)) / NF / VT) / Ic(4) / q1s - 1)^2 - 1))^(-1);
b = 4 * IS * exp( (Vbe(4) - RE*Ic(4)) / NF / VT);
IKF = a1*b;

```

Останнім буде знайдено параметр BF. Однак для цього необхідно знати параметри ISE та NE. Їх знаходження з експериментальних даних пов'язане з труднощами оскільки вимагають вимірювань дуже малих струмів бази та колектора транзистора. Тому ці параметри приймаємо такими, які задані виробником і є в моделі транзистора. При відсутності типу транзистора, що використовується в схемі, беремо ці параметри для його аналога.

В рівнянні використовуємо експериментальну точку 2 (слабка інжекція носіїв заряду).

```

ISE = 972.25e-12
NE = 1.5627
q2s = IS*(IKF^(-1))*exp((Vbe(1, index(2)) - (RE*Ic(1, index(2)))) / (NF*VT))
Nqb(2) = (q1s/2) * (1 + (1 + (4*q2s))^0.5)
BF = Ic(index(2)) * Nqb(2) / (Ib(index(2)) - ISE * exp((Vbe(index(2)) - (RE*Ic(index(2)))) / NE / VT))

```

За описаним алгоритмом з експериментальних даних можна отримати параметри IS, NF, RE, BF, IKF, VAF, що є одними з найважливіших в моделі Гумеля-Пуна.

За допомогою описаного алгоритму знайдемо ці параметри для кожного тестового транзистора. Даний алгоритм є автоматизований і реалізований в середовищі Matlab. Він потребує лише масив експериментальних даних, як вхідний аргумент, і повертає обчислені параметри моделі в робочому вікні Matlab. Приведемо масиви експериментальних даних (рисунок 3.10), що будуть використані для розрахунку параметрів кожного з сімох транзисторів по аналогічному алгоритму.

$$Q1 = \begin{pmatrix} 579 & 597 & 615 & 632 & 648 & 676 & 694 & 721 \\ 1.228 \times 10^{-3} & 2.163 \times 10^{-3} & 3.8 \times 10^{-3} & 6.821 \times 10^{-3} & 0.012 & 0.025 & 0.045 & 0.096 \\ 0.222 & 0.444 & 0.889 & 1.778 & 3.556 & 7.6 & 13.778 & 27.889 \end{pmatrix}$$

$$Q2 = \begin{pmatrix} 593 & 612 & 629 & 645 & 660 & 683 & 705 & 733 \\ 1.608 \times 10^{-3} & 2.826 \times 10^{-3} & 4.999 \times 10^{-3} & 8.935 \times 10^{-3} & 0.016 & 0.03 & 0.061 & 0.123 \\ 0.222 & 0.444 & 0.889 & 1.778 & 3.556 & 6.822 & 14.667 & 28.889 \end{pmatrix}$$

$$Q3 = \begin{pmatrix} 587 & 609 & 627 & 644 & 659 & 680 & 705 & 730 \\ 2.446 \times 10^{-3} & 4.229 \times 10^{-3} & 7.21 \times 10^{-3} & 0.013 & 0.023 & 0.041 & 0.088 & 0.185 \\ 0.222 & 0.444 & 0.889 & 1.778 & 3.556 & 6.667 & 14.556 & 28.889 \end{pmatrix}$$

$$Q4 = \begin{pmatrix} 607 & 626 & 643 & 659 & 675 & 697 & 716 & 742 \\ 3.673 \times 10^{-3} & 6.051 \times 10^{-3} & 9.871 \times 10^{-3} & 0.017 & 0.029 & 0.052 & 0.095 & 0.2 \\ 0.222 & 0.444 & 0.889 & 1.778 & 3.6 & 7.333 & 14.222 & 30.178 \end{pmatrix}$$

$$Q5 = \begin{pmatrix} 586 & 605 & 623 & 640 & 654 & 680 & 700 & 729 \\ 2.231 \times 10^{-3} & 3.82 \times 10^{-3} & 6.704 \times 10^{-3} & 0.012 & 0.02 & 0.039 & 0.072 & 0.173 \\ 0.222 & 0.444 & 0.916 & 1.8 & 3.556 & 7.333 & 13.6 & 31.111 \end{pmatrix}$$

$$Q6 = \begin{pmatrix} 594 & 614 & 631 & 647 & 664 & 677 & 706 & 737 \\ 2.095 \times 10^{-3} & 3.712 \times 10^{-3} & 6.772 \times 10^{-3} & 0.012 & 0.022 & 0.042 & 0.083 & 0.195 \\ 0.222 & 0.444 & 0.889 & 1.778 & 3.556 & 7.2 & 14.222 & 31.111 \end{pmatrix}$$

$$Q7 = \begin{pmatrix} 591 & 610 & 628 & 647 & 660 & 685 & 705 & 735 \\ 2.085 \times 10^{-3} & 3.654 \times 10^{-3} & 6.645 \times 10^{-3} & 0.012 & 0.022 & 0.046 & 0.086 & 0.194 \\ 0.222 & 0.444 & 0.889 & 1.778 & 3.556 & 7.556 & 14.222 & 29.556 \end{pmatrix}$$

Рисунок 3.10 – Масиви експериментальних даних для сімох транзисторів КТ315Б

Перший рядок кожного масиву представляє напругу база-емітер в мілівольтах, другий рядок – струм бази в міліамперах, третій рядок – струм колектора в міліамперах.

Тепер застосуємо автоматизований алгоритм екстракції для масиву експериментальних даних залежності Гумеля кожного транзистора (масиви експериментальних даних вихідних вольт-амперних характеристик приводитися не будуть). Отримані параметри кожного транзистора зведемо до таблиці 3.6 для зручності порівняння.

Таблиця 3.6 – Отримані з експериментальних даних параметри моделі САПР

| Транзистор № | Параметри моделі | | | | | |
|---|------------------|--------|------|-----|-----|-----|
| | IS, пА | NF | RE | BF | IKF | VAF |
| 1 | 42 | 1,0041 | 0.51 | 308 | 505 | 34 |
| 2 | 25 | 1,004 | 0,43 | 231 | 251 | 52 |
| 3 | 34 | 1,0026 | 0,80 | 164 | 278 | 48 |
| 4 | 15 | 1,0053 | 0.24 | 141 | 420 | 44 |
| 5 | 33 | 1,0049 | 0.58 | 186 | 452 | 39 |
| 6 | 25 | 1,0033 | 0,51 | 171 | 536 | 50 |
| 7 | 27 | 1,035 | 0,58 | 165 | 517 | 56 |
| Розбіжність параметру в відносних одиницях | 2,8 | 0,0027 | 3,3 | 2,2 | 2,1 | 1,7 |

Оцінимо можливість практичного використання експериментальних даних в графічному вигляді для випадку проектування без використання САПР.

Приведемо прохідну характеристику в напівлогарифмічному масштабі кожного транзистора на одному графіку на рисунку 3.11.

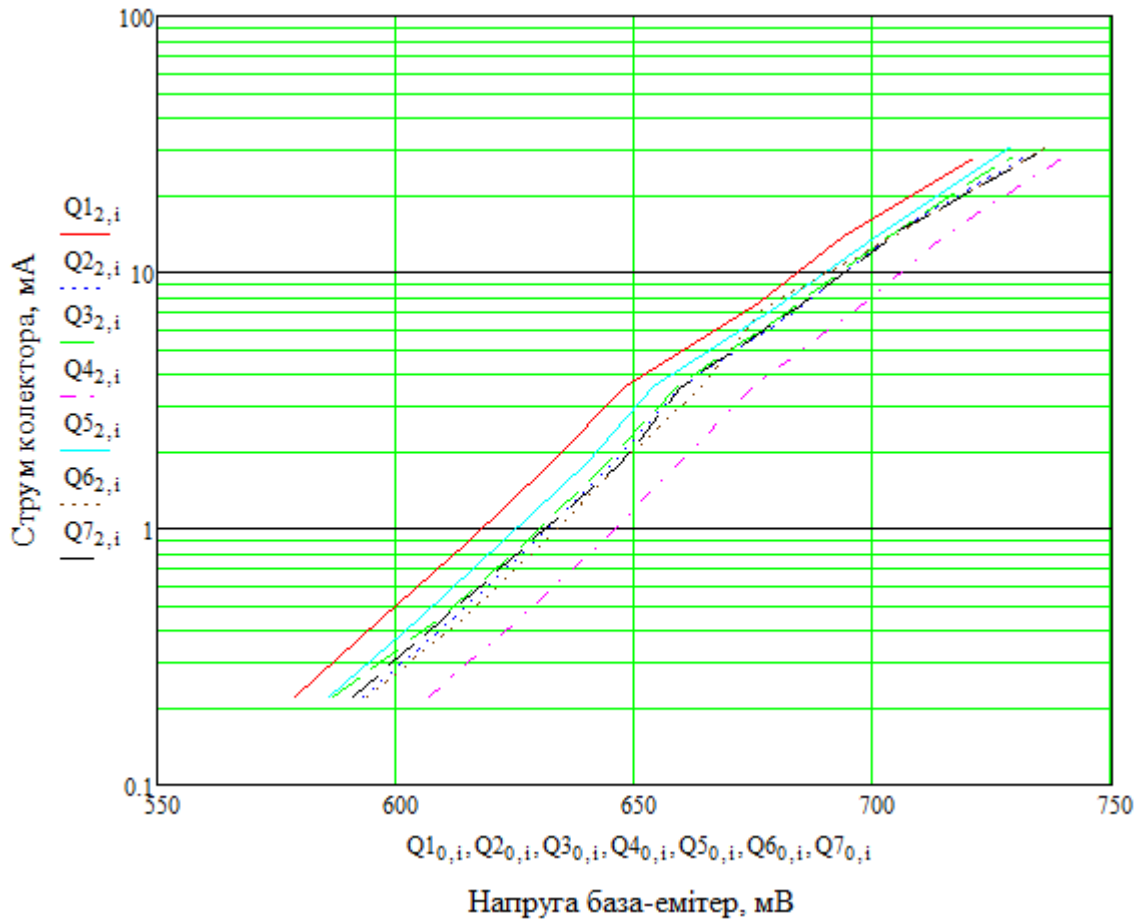


Рисунок 3.11 – Прохідна характеристика в напівлогарифмічному масштабі сімох транзисторів КТ315Б

Прохідна характеристика дозволяє оцінити розбіжність параметрів I_S транзисторів. Наприклад ми бачимо найбільш відмінні по цьому параметру є 1 та 4 транзистори, цей же результат було отримано при екстракції параметрів з рівнянь і приведено в таблиці 3.6. Також видно вплив параметрів R_E та I_{KF} на роботу транзистора при великих струмах колектора у вигляді зменшення нахилу даної характеристики.

Ця характеристика є корисною для порівняння аналогічності транзисторів і дозволяє без проведення розрахунків підібрати близькі за параметрами компоненти.

Приведемо також залежність струму бази від напруги база-емітер в напівлогарифмічному масштабі (рисунок 3.12).

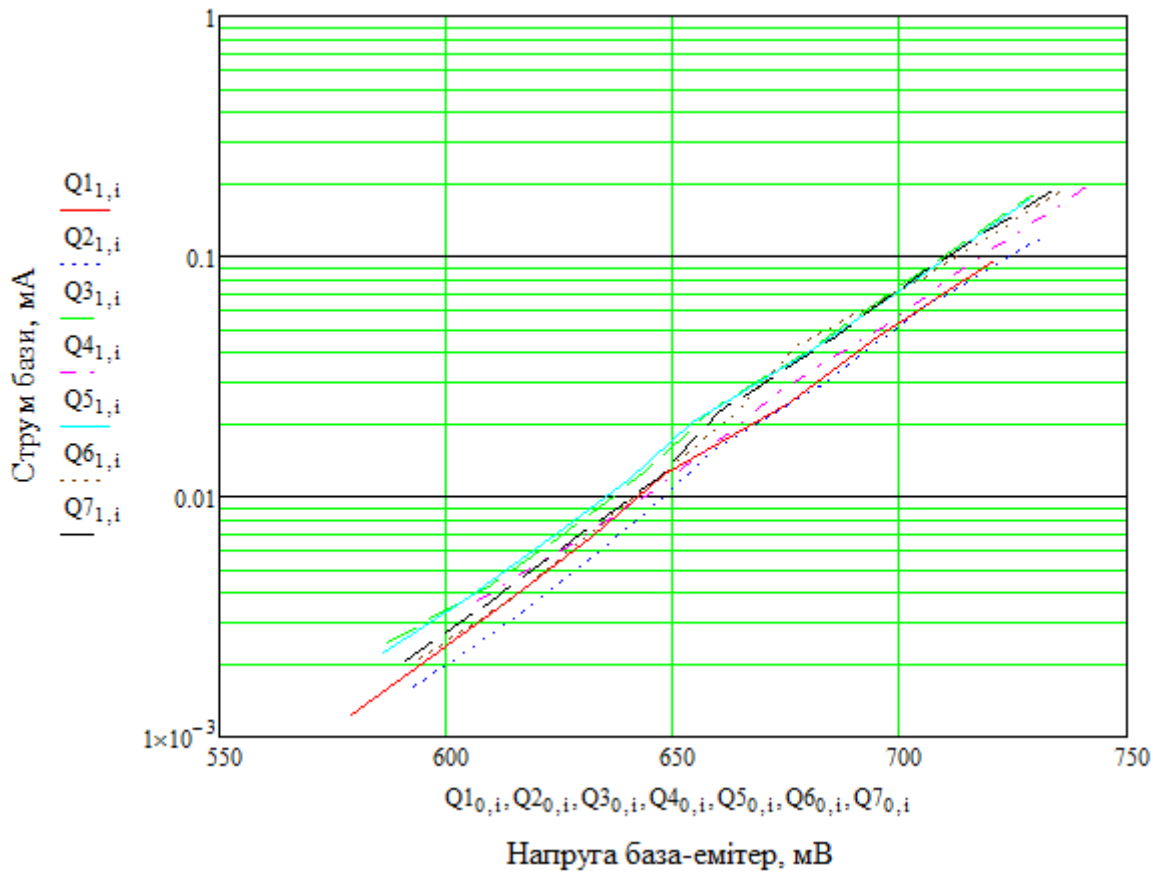


Рисунок 3.12 – Залежність струму бази від напруги база-емітер в напівлогарифмічному масштабі для сімох транзисторів КТ315Б

Із рис. 3.12 видно, що при сильній інжекції нахил характеристики струму бази на великих його значеннях, не впливає на крутість характеристики, а впливає лише на значення струму колектора.

Ще однією корисною характеристикою транзисторів є залежність коефіцієнту передачі струму бази від струму колектора (рисунок 3.13).

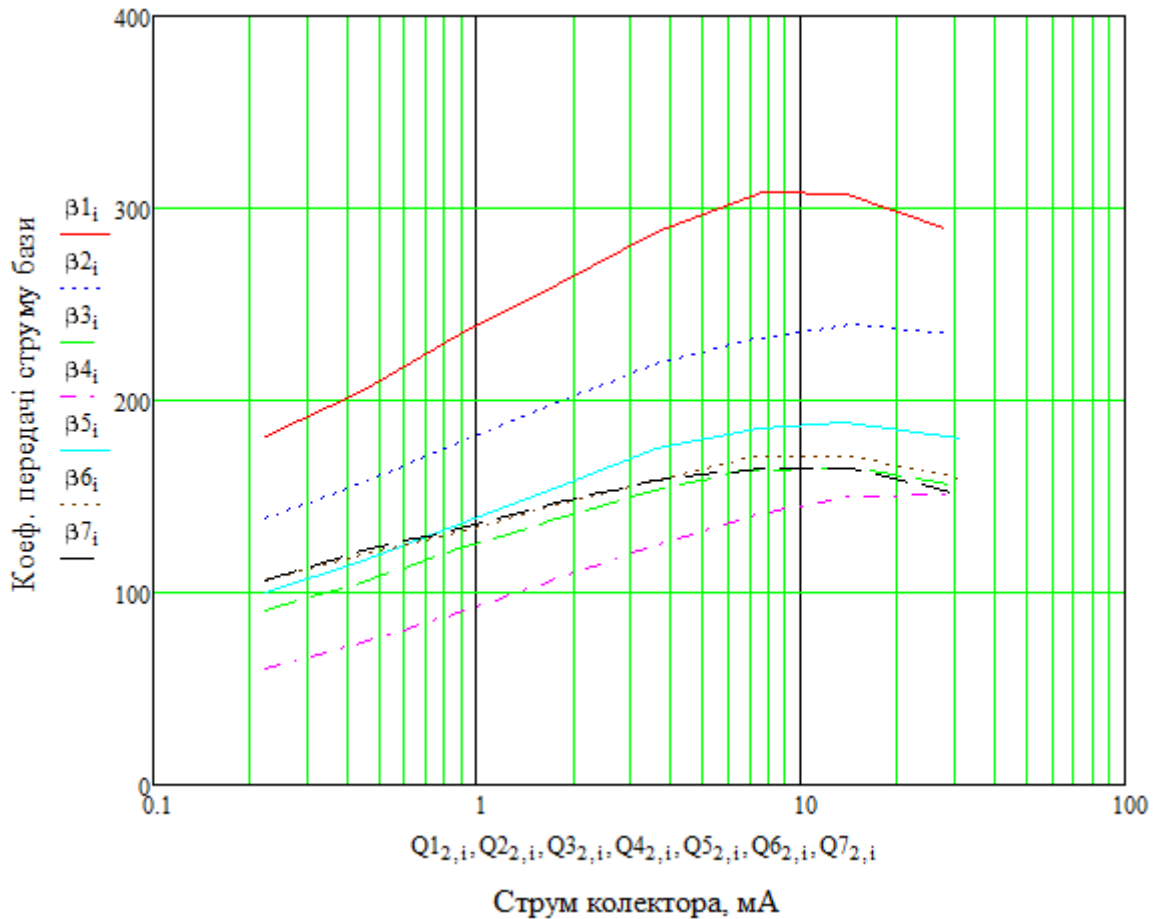


Рисунок 3.13 – Залежність коефіцієнту передачі струму бази від струму колектора тестових транзисторів в напівлогарифмічному масштабі

Дана характеристика також дозволяє переконатися в присутності ефекту сильної інжекції у вигляді спаду коефіцієнту передачі струму бази. За допомогою даної характеристики проектувальник може обрати оптимальний струм колектора транзистора для досягнення максимального підсилення за струмом. Як бачимо цей струм має значення близько 10-20 мА для транзисторів КТ315Б.

3.3 Алгоритм вимірювання частотних характеристик

Частотні параметри напівпровідників є важливими, оскільки найчастіше приходится підсилювати струм, що змінюється в часі. Підсилення без спотворень та рівень вихідного сигналу залежать від здатності транзистора працювати на цій частоті. Надалі будемо аналізувати роботу транзистора на гармонічному сигналі, оскільки згідно з теорією Фур'є будь-який періодичний сигнал в необхідному наближенні можна представити скінченною сумою гармонічних сигналів. Цей підхід значно спрощує розуміння чому, наприклад, прямокутний сигнал з різкими фронтами підсилюється з певними спотвореннями, а саме затягуванням фронтів. Якщо розглядати вхідний прямокутний сигнал як суму нескінченної кількості гармонік, то у вихідному сигналі не вистачає гармонік вище певної частоти. З наближенням до цієї частоти підсилення транзистора починає падати, і з ростом частоти прямує до нуля. Частота на якій коефіцієнт підсилення транзистора падає в 2 рази від значення на низькій частоті називається гранично-допустимою робочою частотою $f_{гр}$.

Через складність реалізації вимірювання статичних та динамічних характеристик в одному пристрої, було прийнято рішення використати зовнішній генератор гармонічних коливань для формування вхідного корисного сигналу, а робочу точку по постійному струму задавати розробленим пристроєм.

Необхідно створити систему, яка дасть змогу отримувати інформацію про відношення амплітуди сигналу на виході каскаду підсилення з досліджуваним транзистором до сигналу на його виході, а також інформацію про зсув фаз між вхідним та вихідним сигналом. Розробимо таку систему в середовищі Simulink пакету Matlab. Транзистор в даному випадку можна представити однополюсною системою. Для перевірки правильності роботи вимірювальної системи, такої апроксимації буде цілком достатньо.

На виході системи формуються виключно постійні сигнали, для можливості подальшого вимірювання аналого-цифровим перетворювачем та використання цих даних для обрахунків.

Розглянемо модель вимірювальної системи. На вхід досліджуваного транзистора подається зміщення по постійному струму від розробленого пристрою для вимірювання статичних та температурних характеристик. Гармонічний сигнал подається з зовнішнього генератора. Для дослідження системи було встановлено коефіцієнт підсилення транзистора на постійному струмі рівним 200 та його полюс передатної характеристики рівним 10 Мрад/с. Після транзистора вмикається регульований атенюатор, для того щоб на низькій частоті нормувати коефіцієнт підсилення транзистора до 1. В даному випадку ми повинні записати значення послаблення атенюатора рівному 200, оскільки таким є підсилення транзистора на нульовій частоті. Для відділення корисного гармонічного сигналу від постійної складової використовуються фільтри високої частоти. Далі ідуть змішувачі, на виході яких будуть постійні складові що несуть інформацію про підсилення досліджуваного транзистора та зсув фаз. Тому щоб відділити корисні сигнали нульової гармоніки використовуємо фільтри низької частоти. Для відображення значень постійних напруг використовуються дисплеї. Також вихідний сигнал подається на осцилограф для слідкування за закінчення перехідних процесів в даній вимірювальній системі. Спочатку встановимо відносно низьку частоту для даного транзистора 1 Мрад/с. Він повинен досить добре підсилити цей корисний гармонічний сигнал з коефіцієнтом підсилення майже 200. Нормуємо значення підсилення на цій частоті до 1 за допомогою атенюатора. Система вимірювання спроектована в середовищі Simulink приведена на рисунку 3.14.

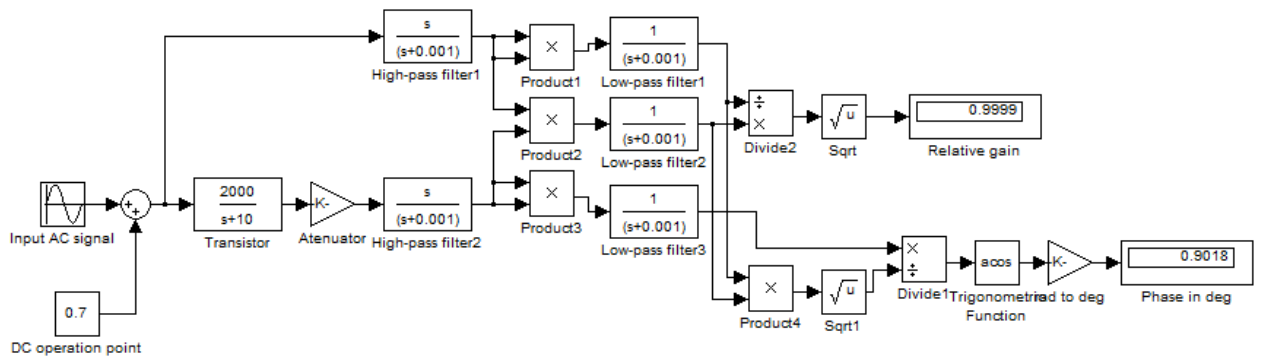


Рисунок 3.14 – Модель системи вимірювання амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик транзисторів при відносно низькій частоті вхідного сигналу

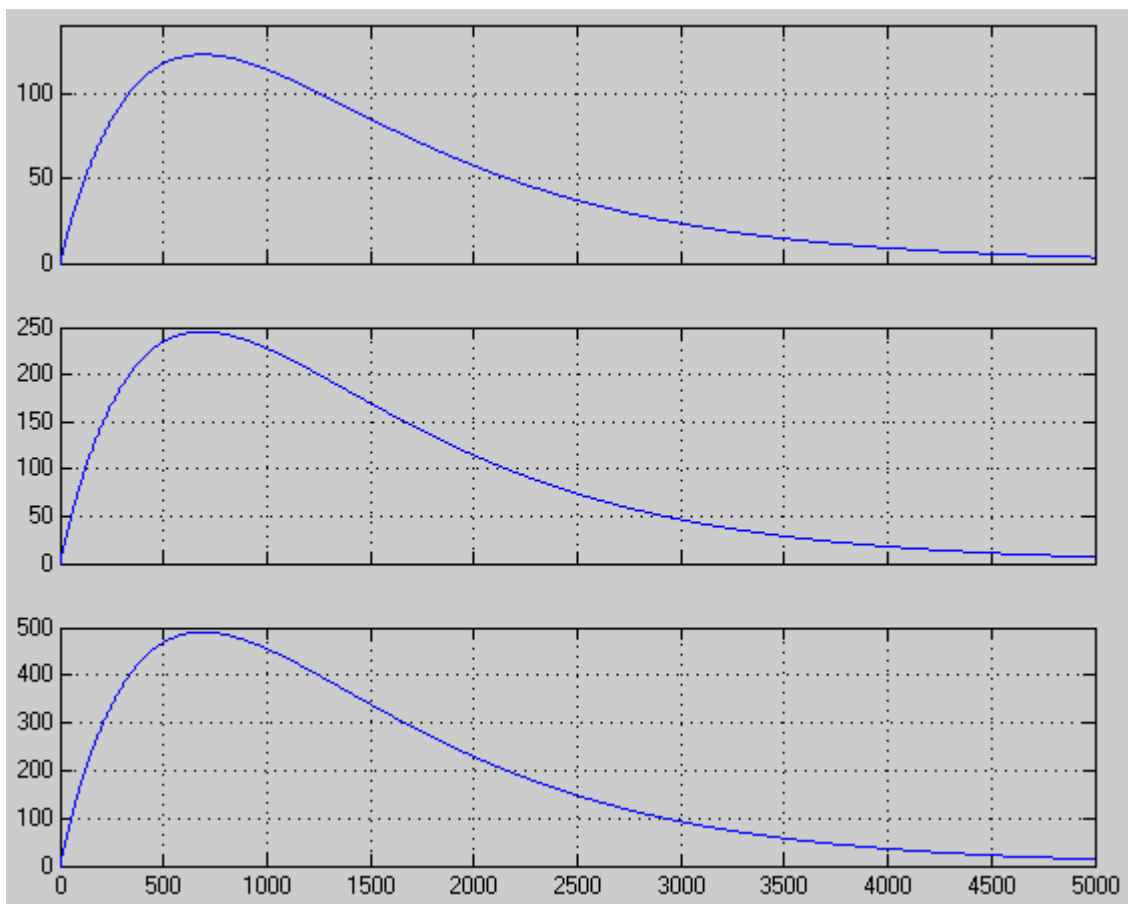


Рисунок 3.15 – Перехідний процес системи протягом 5000 періодів вхідного сигналу

Спостерігаючи сигнали на виході, які повинні бути постійними, бачимо перехідний процес (рисунок 3.15). Експериментально аналізуючи процес встановлення, робимо висновки що для завершення перехідного процесу необхідно почекати 15000 мкс/рад (94 мс) періодів вхідного гармонічного

сигналу. Цей час необхідно чекати перед вимірюванням сигналу на виходах системи (рисунок 3.16).

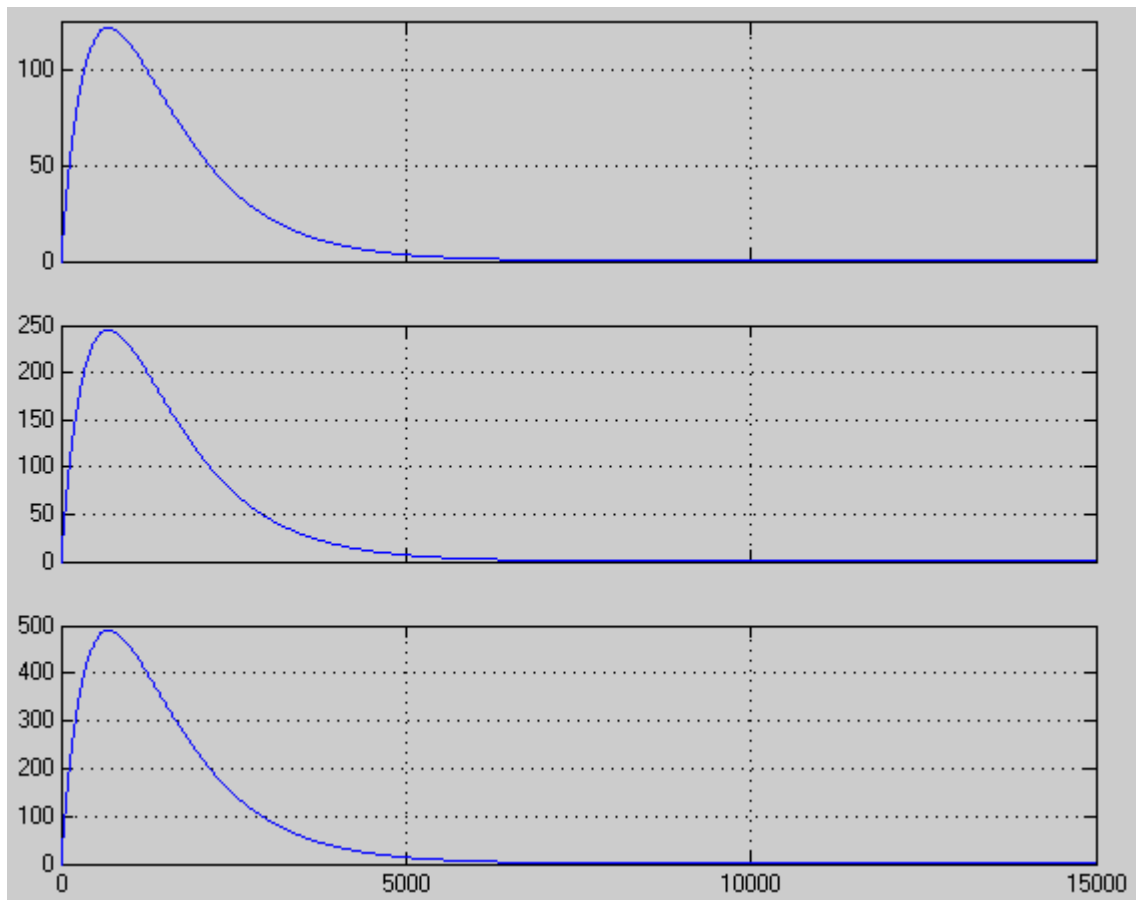


Рисунок 3.16 – Перехідний процес системи протягом 15000 періодів вхідного сигналу

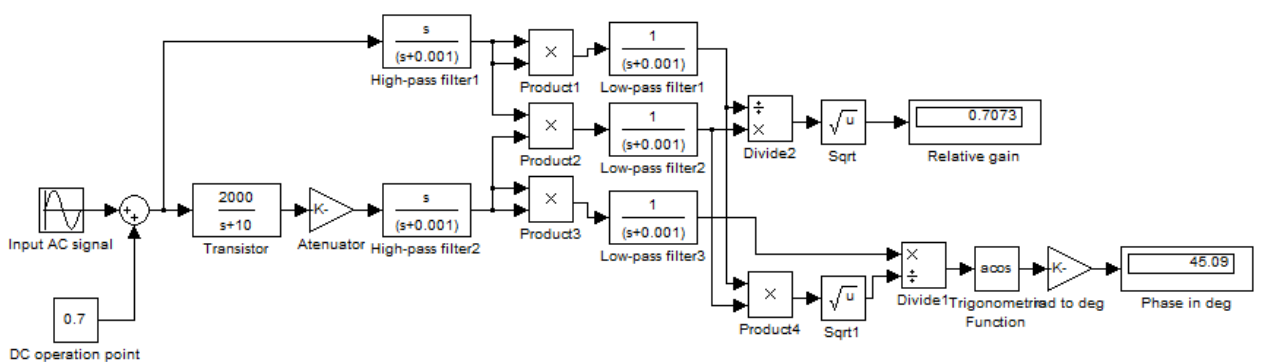


Рисунок 3.17 – Модель системи вимірювання амплітудно-частотних та фазо-частотних характеристик транзисторів при вхідній частоті рівній частоті зрізу досліджуваного транзистора

Як відомо зсув фаз між вхідним та вихідним сигналом однополюсної системи складає якраз 45° при падінні коефіцієнту передачі у 1,41 рази. Одже переконуємось що система працює вірно, оскільки при подачі на

однополюсну систему сигналу з частотою рівній частоті зрізу системи, що імітує реальний транзистор, ми вирахували з вихідних даних падіння коефіцієнту передачі уявного транзистора у 1,41 рази та зсув фази вхідного сигналу на 45° , що відповідає частотній характеристиці однополюсної системи (рисунок 3.17).

3.4 Алгоритм вимірювання теплових характеристик

Вимірювання теплових характеристик напівпровідників, серед яких не тільки транзистори, а й діоди та стабілітрони є ще одним практичним завданням, що може бути реалізоване з використанням даного пристрою. Вирішення цієї задачі прямим способом вимагає використання керованої термокамери та вимірювача температури що зв'язані з пристроєм. Це спосіб ускладнює пристрій та вимагає використання барокамери та електронного вимірювача температури. Ще одним суттєвим недоліком є мала швидкість вимірювання, оскільки зміна температури в барокамері проходить повільно через теплову інертність останньої. Тому був розроблений досить цікавий метод вимірювання теплових характеристик, що вимагає використання лише повітряного охолоджувача, який працює незалежно від пристрою.

Вирішення першої задачі з необхідністю нагрівання НП знаходиться в фундаментальній властивості електричного струму нагрівати матеріал через який він проходить. Значення теплової потужності що прикладена до досліджуваного компоненту рівне сумі добутків напруги та струму на кожному з зажимів напівпровідника. Значення цих напруг та струмів вимірюються досить точно, оскільки це є основним завданням пристрою. Незважаючи на те, що ми знаємо точне значення потужності, що виділяється на НП, його температура залежить від тепловіддачі корпусу в навколишнє середовище. Інтенсивність тепловіддачі є температурно-залежною через конвекційну складову тепловіддачі корпусу НП. Однак відомо, що при розсіянні потужності НП пристроєм його НП кристал завжди має вищу температуру за сам корпус пристрою, при чому різниця температур між

кристалом та корпусом є прямо пропорційною потужності розсіювання НП пристрою з коефіцієнтом постійним в межах одного типу корпусу НП пристрою. Тому якщо вдасться зафіксувати температуру корпусу близькою до температури навколишнього середовища, що вважаємо постійною протягом проведення вимірювань, та відомою через наявність термометра в лабораторії.

Можливість оцінки температури кристалу НП гарно ілюструється наступним описом зображення поширеного корпусу TO92 на рисунку 3.18.



Рисунок 3.18 – Зображення з описом характеристик тепловіддачі корпусу TO-92

В даному описі використані терміни електротеплової аналогії, в якій процеси тепловіддачі описані за допомогою елементів теорії електричних кіл, а саме: джерелом струму є аналогією виділення потужності на колекторі, напруга є аналогією температури, резистори є аналогією теплового опору середовищ (нездатності проводити тепло). Також інколи використовують конденсатор як аналогію теплової ємності корпусу НП приладу.

Рисунок 3.18 показує, що для типу корпусу TO-92, при виділенні потужності на колекторі рівній 0,5 Вт, температура кристалу транзистора

зросте на 100 градусів вище температури навколишнього середовища. Однак ця залежність нелінійна якщо транзистор охолоджується за допомогою конвекції, оскільки швидкість повітряних потоків при конвекції залежить від потужності розсіювання. Тому необхідно знайти спосіб зменшення теплового опору корпус-середовище, так щоб ним можна було знехтувати, і тоді в еквівалентній схемі залишиться лише температурно-незалежний тепловий опір кристал-корпус. Найефективнішим способом є використання водяного охолодження, але це спосіб вимагає занурення транзисторів в резервуар з дистильованою водою та створення потоку води. Дистильовану воду необхідно регулярно змінювати, через забруднення домішками. Це є не дуже зручно. Тому спробуємо розробити систему інтенсивного повітряного охолодження.

На рисунку 3.19 приведені параметри в методі електротеплової аналогії.

| Тепловая характеристика | Ед.изм. | Электрический аналог ^{[3][4]} | Ед.изм. |
|-------------------------|-------------|--|---------|
| Температура | К или °С | Напряжение | В |
| Количество теплоты | Дж или Вт·с | Заряд | Кл |
| Тепловой поток | Вт | Ток | А |
| Тепловое сопротивление | К/Вт | Сопротивление | Ом |
| Теплоёмкость | Дж/К | Ёмкость | Ф |
| Источник тепла | | Идеальный источник тока | А |
| Окружающая среда | | Идеальный источник напряжения | В |

Рисунок 3.19 – Параметри в методі електротеплової аналогії

Зобразимо електричну еквівалентну схему в термінах електротеплової аналогії на рисунку 3.20.

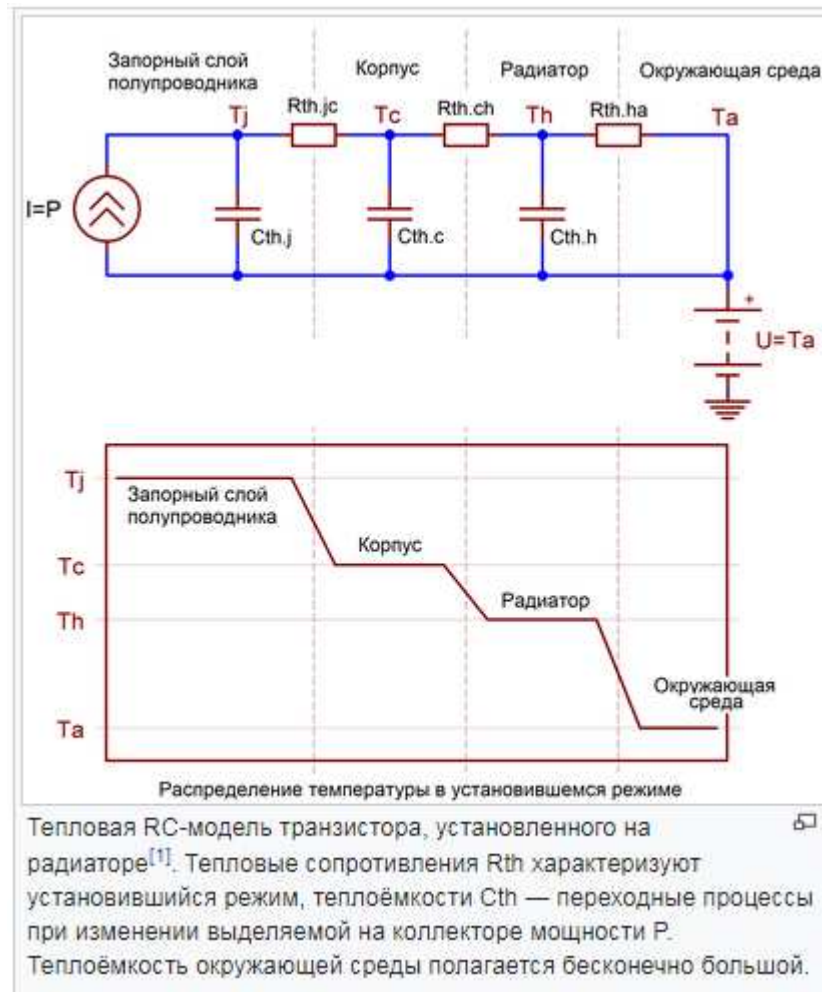


Рисунок 3.20 – Теплова RC-модель транзистора з радіатором

В нашому випадку радіатора немає і потік тепла іде безпосередньо з корпусу в навколишнє середовище. В цьому випадку електротеплова схема виглядає як на рисунку 3.21.

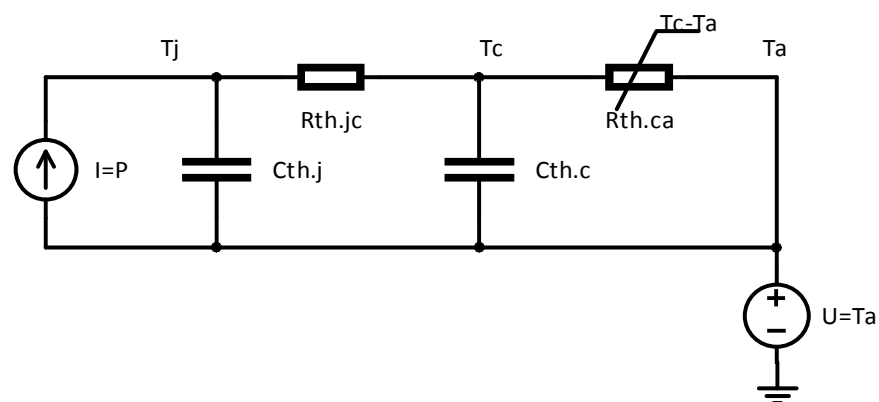


Рисунок 3.21 – Теплова RC-модель транзистора, що охолоджується шляхом повітряної конвекції

Якщо ми забезпечимо інтенсивне охолодження навколишнім повітрям, то значення теплового опору $R_{th.ca}$ значно зменшується до рівня, коли ним можна знехтувати. Внаслідок цього також шунтується конденсатор $C_{th.c}$, але оскільки реальна фізична модель має розосереджені теплові параметри, на відміну від приведеної, то $C_{th.c}$ будемо враховувати. Перерахуємо його значення з коефіцієнтом 0,5, враховуючи що питома теплоємність корпусу рівномірно розподілена по всьому корпусу. Отже отримуємо схему електротеплової аналогії приведеної на рисунку 3.22.

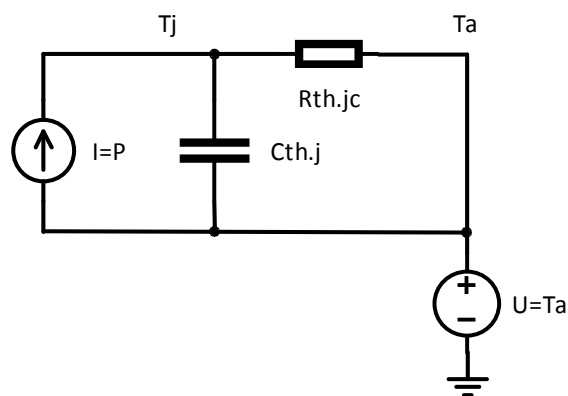


Рисунок 3.22 – Теплова RC-модель транзистора, що охолоджується шляхом інтенсивного зовнішнього повітряного охолодження

Отримали схему яка включає теплоємність кристалу кремнію $C_{th.c}$. Вона має значно менше значення ніж теплоємність корпусу, але нею нехтувати не можна. Це значить що під час вимірювання необхідно буде

Теплоємності реальних НП пристроїв, як правило, недоступні і можуть бути грубо оцінені, виходячи з їх фізичних розмірів. Публікації реальних даних, що вимірюються заводськими лабораторіями, відносно рідкісні. Наприклад, для потужного транзистора MJE15023 виробництва Motorola (максимальний струм колектора 16 А) теплоємність кристалу рівна 0,1 Дж/К, теплоємність корпусу TO-3 3 Дж/К. Як бачимо теплоємність кристалу набагато менша теплоємності корпусу. Тож оцінюючи час перехідного процесу по температурі, будемо оцінювати теплоємність корпусу, як добуток матеріалу корпусу помножений на питому теплоємність матеріалу корпусу. Також братимемо час перехідного процесу з певним запасом по значенню.

Питомі теплоємності основних матеріалів з яких роблять корпуса напівпровідників приведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Питомі теплоємності матеріалів

| Матеріал | Питома теплоємність, Дж/(кг·К) |
|-----------------|--------------------------------|
| Мідь | 380 |
| Пластик | 1300.. 2300 |
| Смола епоксидна | 800.. 1100 |
| | |

Розрахуємо теплоємності корпусів транзисторів і зведемо результат до таблиці 3.8.

Таблиця 3.8 – Розраховані теплоємності корпусів транзисторів

| Корпус | Маса, г | Матеріал | Теплоємність, Дж/К |
|--------------------------|---------|-------------------|--------------------|
| ТО-92 (КТ-26) | 0,4 | пластик | 0,72 |
| ТО-220 | 2,8 | Пластик, метал | 3 |
| ТО-126 | 1,5 | Пластик, метал | 1,8 |
| SOT-23 | 0,05 | пластик | 0,09 |
| КТ-13 (транзистор кт315) | 0,13 | пластик | 0,23 |
| ТО-3 | 18 | метал | 18 |
| ТО-18 | 0,32 | метал | 0,32 |
| КТЮ-3-20 | 22 | метал | 22 |
| ТО-39 | 1,2 | метал | 1,2 |
| ТО-247 | 7,5 | Метал, пластик | 9,8 |

Дані про теплоємність корпусів транзисторів повинні бути використані при вимірюванні теплових характеристик транзисторів. Цей параметр дає

програмі інформацію про час впродовж якого необхідно нагрівати транзистор, коли температуру його кристалу можна буде вважати остійною.

Теплоємність корпусу разом з термальним опором кристал-корпус вводиться в відповідні рядки у вікні програми (рисунок 3.23).

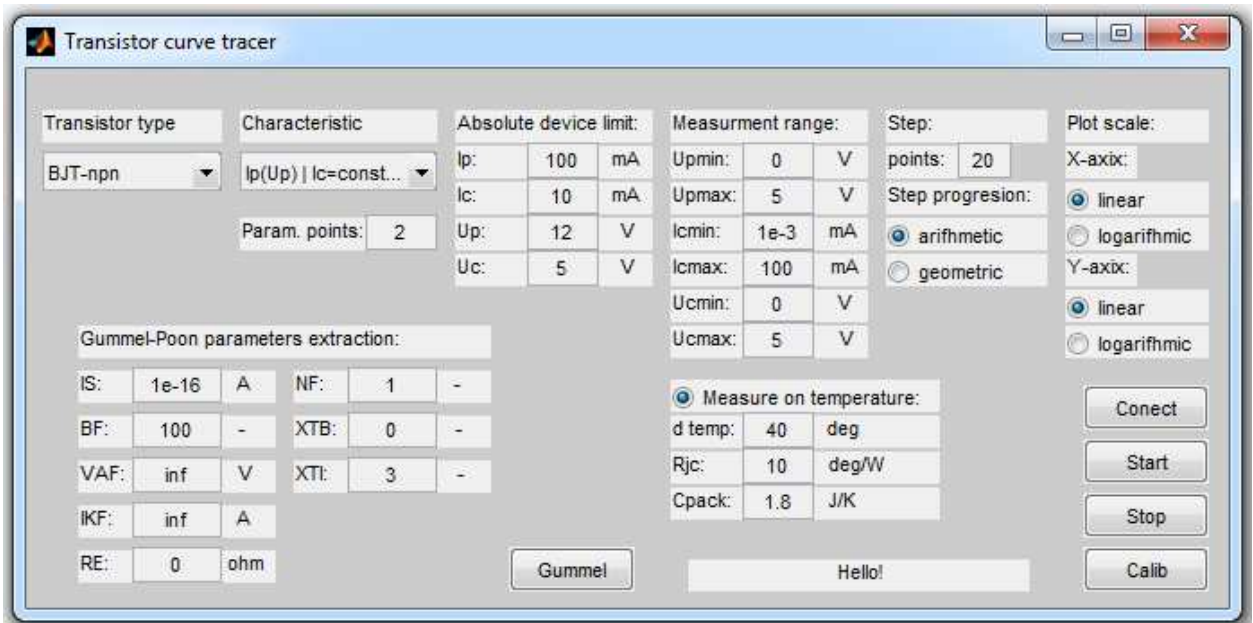


Рисунок 3.23 – Вибір вимірювання температурних характеристик

Для вибору режиму вимірювання температурних характеристик необхідно натиснути радіокнопку “Measure on temperature”. При цьому буде вимірюватись не безпосередня залежність якогось параметру від температури, а буде будуватись характеристика, яка обрана зі списку випадального меню “Characteristic” на двох різних температурах. Першим значенням температури на якому будується характеристика є кімнатна температура. Другим значенням є температура вища за кімнатну на значення “d temp”. Для підвищення точності вимірювання температурної залежності, та кращої візуалізації результату рекомендується задавати значення “d temp” більше 20 °C.

3.5 Дослідження впливу нагрівання кристалу транзистора в процесі вимірювання

Процес вимірювання характеристик та параметрів напівпровідників безумовно пов’язаний з пропусканням через їх зажими електричного струму

при одночасному падінні напруги на них. Це спричиняє нагрівання компоненту в процесі вимірювання. Як результат це вносить похибку в результати вимірювання, оскільки статичні та динамічні параметри повинні нормуватися при певному постійному значенні температури. Важливим фактом є те, що це явище не можна усунути інтенсивним охолодженням навколишнім повітрям, оскільки як було описано в розділі 3.9 між кристалом напівпровідника та корпусом компоненту існує скінченний тепловий опір.

У цьому розділі ми дослідимо вплив нагрівання компоненту на достовірність результатів вимірювання, розглянемо способи зменшення нагрівання компоненту, а також розробимо методику яка дозволяє врахувати нагрівання компоненту та корегувати експериментальні результати.

У більшості параметрів математичної моделі транзистора присутня температурна залежність. У деяких параметрів ця залежність сильніша ніж у інших, також температурні залежності параметрів мають різну повторюваність від транзистора до транзистора. Ось наприклад ті що стосуються робочих точок транзисторів по входу:

- Температурна залежність напруги база-емітер біполярного транзистора. Спостерігається як зміна напруги база-емітер при постійному струмі бази. Аналогічна залежність характерна для будь-якого прямозмщеного n-p переходу. Залежність є нелінійною в широкому температурному діапазоні, але має досить добре повторюване типове значення $-2\text{мВ}/^\circ\text{C}$ при кімнатній температурі.
- Температурна залежність порогової напруги заслін-витік польового транзистора. Спостерігається як зміна напруги заслін-витік, що необхідно прикласти для пропускання того ж струму стоку. Причиною є температурна залежність напруги Фермі. Залежність є нелінійною в широкому температурному діапазоні з типовим значенням $-2\text{мВ}/^\circ\text{C}$ при кімнатній температурі.

Вплив температури на роботу біполярного транзистора обумовлено трьома фізичними факторами: зменшенням потенційних бар'єрів в переходах, збільшенням теплових струмів переходів і збільшенням коефіцієнтів передачі струмів з ростом температури. Зменшення потенціального бар'єру з ростом температури також, як і в ізольованому переході, призводить до посилення інжекції, в результаті чого збільшується вхідний струм транзистора. На рис. 3.24 наведені вхідні характеристики транзистора в схемі зі спільною базою, отримані при різних температурах (зауважимо, що вхідні характеристики в схемі ОЕ при різних температурах виглядають аналогічно і відрізняються лише масштабом по осі струмів так як $I_K \gg I_B$). Як видно з малюнка 3.24, збільшення вхідного струму з ростом температури еквівалентно зсуву характеристики в бік менших вхідних напруг. Цей зсув описується температурним коефіцієнтом напруги, який становить для кремнієвих транзисторів близько $\varepsilon = -2 \text{ мВ} / ^\circ\text{С}$.

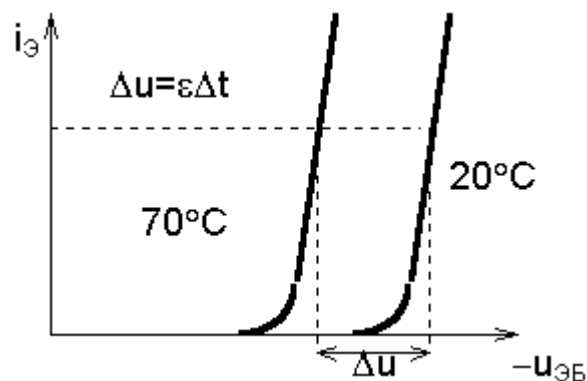


Рисунок 3.24 – Залежність вхідної характеристики транзистора від температури

Збільшення теплових струмів переходів з ростом температури, описується температурними залежностями струмів $I_{КБ0}$, $I_{ЕБ0}$. Типові залежності струмів $I_{КБ0}$ і $I_{ЕБ0}$ від температури для кремнієвого малопотужного транзистора наведені на рисунку 3.25.

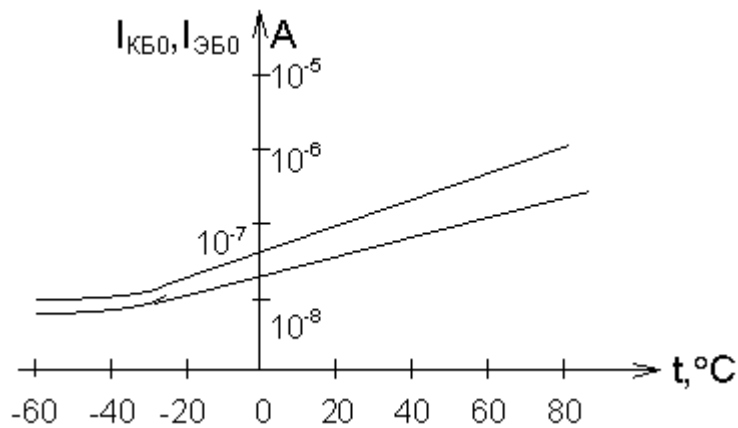


Рисунок 3.25 – Залежність теплових струмів від температури

Використання логарифмічного масштабу по осі ординат дозволило уявити експонентну залежність струмів від температури в лінійному вигляді. Як видно з малюнка, в робочому інтервалі температур транзистора ($-60^{\circ}C \dots +80^{\circ}C$) струми I_{KBO} і I_{EBO} можуть змінюватися на 1 ... 2 порядки. Слід зауважити, що зазначене зростання теплових струмів помітно позначається на вихідних характеристиках лише германієвих транзисторів, що пов'язано з відносно великою величиною самих теплових струмів. У кремнієвих транзисторах теплові струми дуже малі, тому їх зміна з температурою не робить помітного впливу на характеристики. Збільшення коефіцієнта передачі струму емітера α і струму бази β з ростом температури обумовлено зростанням часу життя електронів в базі і відповідним ослабленням їх рекомбінації з дірками. На рисунку 3.26 наведені типові температурні залежності коефіцієнтів α і β , нормованих до значень, отриманих при кімнатній температурі ($t = 20^{\circ}C$).

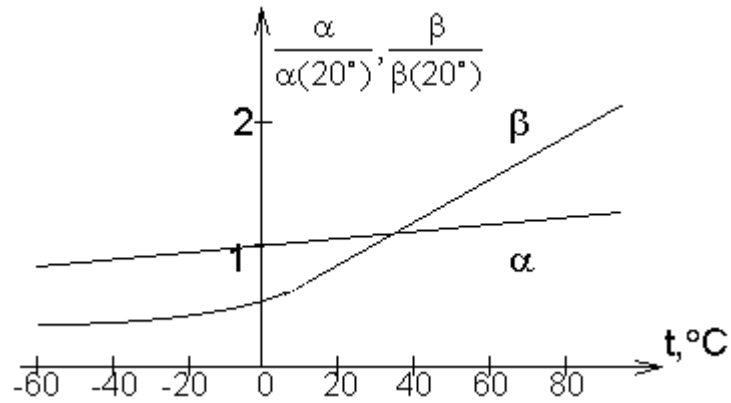


Рисунок 3.26 – Залежність коефіцієнтів передачі струмів бази та емітера від температури

З малюнка видно, що якщо зміна α з температурою виражено дуже слабо (в робочому інтервалі температур воно не перевищує декількох відсотків), то зміна β може досягати декількох сотень відсотків.

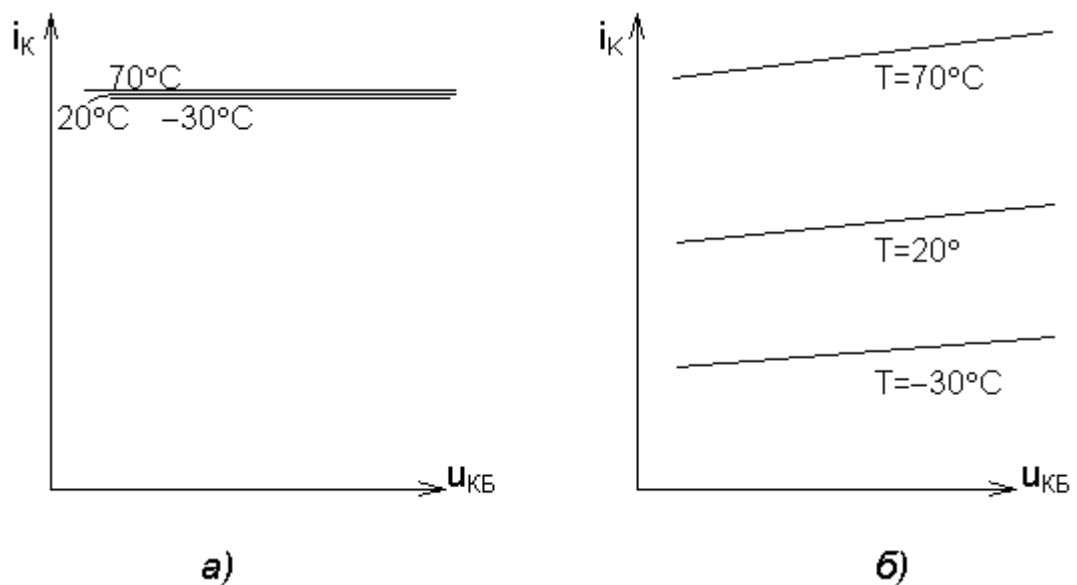


Рисунок 3.27 – Залежність струмів колектора від температури для схем включення СБ та СЕ

Сказане вище ілюструють наведені на рисунку 3.27 вихідні характеристики транзистора в схемах СБ і СЕ, отримані при різних температурах. Як видно з малюнка, збільшення температури призводить до зміщення (дрейфу) характеристик в сторону більш високих струмів колектора. При цьому в схемі СБ при фіксованому струмі емітера $\Delta I_K = \Delta \alpha \cdot I_E$ температурний дрейф характеристик виражений досить слабо, що

пояснюється слабкою температурної залежністю коефіцієнта передачі струму емітера α , як показано на рисунку 3.26. У характеристик для схеми СЕ, що вимірюються при $I_B = const$, в зв'язку з сильною температурної залежністю коефіцієнта передачі струму бази β температурний дрейф дуже великий - зміна струму колектора $\Delta I_K = \Delta \beta \cdot I_B$ може досягати кілька десятків і навіть сотень відсотків. Температурна нестабільність характеристик транзистора в схемі СЕ вимагає спеціальних заходів по стабілізації робочої точки.

Проведений аналіз свідчить, що існують сильні температурні залежності деяких параметрів біполярного транзистора.

Для зменшення впливу нагрівання кристалу транзистора в процесі вимірювання на точність вимірювань можна використати декілька рішень.

Першим рішенням є безпосереднє зменшення потужності розсіювання при тому ж струмі через колектор, шляхом зменшення напруги колектор-емітер. При вимірюванні багатьох характеристик напруга колектор-емітер встановлюється постійною зі значення зазвичай більшим напруги насичення. Тому якщо абсолютне значення напруги колектор-емітер слабо впливає на результати вимірювання і є можливість встановити меншу напругу, то це дозволить зменшити потужність розсіювання пропорційно зменшенню напруги. Наприклад при вимірюванні характеристик Гумеля-Пуна, які є основними при формуванні параметрів математичної моделі на постійному струмі, напруга колектор-емітер встановлюється постійною зі значенням більшим напруги насичення. Оскільки типовим значенням напруги насичення колектор-емітер є значення 0,2 В – 0,5 В, то значення напруги колектор-емітер як параметру варто обирати дещо більше цього значення, близько 1 В . Для більшої раціональності вибору цього значення рекомендується виміряти спочатку вихідну вольт-амперну характеристику транзистора, на якій буде видно точне значення напруги насичення колектор-емітер.

Другим рішенням є проведення швидкого вимірювання. Це рішення має місце оскільки будь-який реальний компонент має ненульову теплоємність

кристалу та корпусу. Через це для того щоб вони нагрілись, при виділенні постійної потужності необхідний певний час. Якщо вимірювання проводити швидко, то при тій же потужності розсіювання, нагрівання кристалу буде зменшуватись приблизно пропорційно зменшенню часу вимірювання. Цей спосіб вимагає використання швидкого АЦП, що принципово виключає можливість використання сігма-дельта АЦП з усіма їх перевагами. Також існує обмеження швидкості вимірювання, через вплив частотних характеристик транзистора. Також зменшити час вимірювання можна зменшивши кількість точок вимірювання.

Третім рішенням є забезпечення часових затримок між точками вимірювання. Цей спосіб є корисним коли збільшити швидкість вимірювання немає змоги. Він ґрунтується на збільшенні часу теплообміну з навколишнім середовищем при тому ж часі виділення потужності на кристалі. Нагрівання зменшується приблизно пропорційно зменшенню відношення часу виділення потужності до всього часу вимірювання. Недоліком є зменшення швидкості вимірювання, але якщо алгоритм зробити адаптивним, то це зменшення буде відбуватися лише на великих струмах через досліджуваний транзистор.

Усі описані способи зменшення нагрівання кристалу напівпровідника в процесі вимірювання обов'язково передбачають використання інтенсивного повітряного охолодження, яке значно підвищує ефективність всіх описаних методів. При цьому температура в лабораторії де проводяться вимірювання відома і складає близько 25°C.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Основним завданням охорони праці є забезпечення безпечних та комфортних умов праці.

Враховуючи що темою магістерської дисертації є пристрій вимірювання параметрів напівпровідникових приладів для формування їх математичних моделей САПР, основна увага в цьому розділі приділена питанням, які стосуються електробезпеки та безпеки виконання технологічного процесу пайки EPE, а також розробки заходів щодо покращення умов праці.

В цьому розділі визначені основні потенційно шкідливі виробничі фактори що мають місце при виконанні науково-дослідної роботи, а також запропоновані необхідні технічні рішення та організаційні заходи з безпеки та гігієни праці та виробничої санітарії, і визначені основні заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Впровадження та подальше використання пристрою студентами повинно бути безпечне для здоров'я та життя людини. Саме тому необхідно проаналізувати всі потенційно небезпечні виробничі фактори, що присутні в лабораторії навчального корпусу, в тому числі при роботі з паяльним обладнанням, вимірювальними електроприладами та комп'ютером. Умови праці в процесі розробки та використання пристрою повинні відповідати існуючим санітарним нормам та вимогам техніки безпеки. У цьому розділі визначені основні заходи безпеки в надзвичайних ситуаціях, розроблені заходи з електробезпеки, виробничої санітарії та гігієни.

4.1 Визначення основних потенційно-небезпечних та шкідливих виробничих факторів при виконанні науково-дослідної роботи

Визначимо основні потенційно небезпечні й шкідливі фактори можуть мати місце при розробці й виготовленні даного пристрою, зокрема, при проведенні технологічного процесу пайки ЕРЕ:

- можливість поразки електричним струмом;
- забрудненість і загазованість повітря робочої зони при виконанні технологічного процесу пайки;
- вплив інфрачервоного випромінювання від нагрітого паяльника;
- вплив бризів і краплі розплавленого припою
- недостатня освітленість робочого місця;
- вплив високочастотного електромагнітного поля;
- група психологічних факторів(перевантаження фізичні та емоційні);
- невідповідність параметрів мікроклімату (вологість, температура, швидкість руху повітря та інші) санітарним нормам;

4.2 Технічні рішення та організаційні заходи з безпеки і гігієни та виробничої санітарії

4.2.1 Розрахунок концентрації аерозолі свинцю в повітрі робочої зони при проведенні технологічного процесу пайки ЕРЕ

Технологічний процес пайки ЕРЕ обов'язково супроводжується виділенням різних хімічних речовин у повітря у вигляді парів та газів, або у вигляді часточок розплавленого припою та каніфолі. Також в процесі обробки плати після пайки використовують розчинники на основі спиртів та похідних бензину, що мають властивість легко випаровуватись і потрапляють в легені людини.

Приведемо таблицю 4.1 хімічних засобів, що використовують в процесі пайки та хімічної обробки друкованих плат.

Таблиця 4.1 – Потенційно небезпечні хімічні засоби

| Компоненти | Характер токсичної дії | Клас безпеки | ГДК у повітрі робочої зони мг/м ³ |
|------------------|--|--------------|--|
| Каніфоль соснова | Має наркотичну і дратівну дію. Викликає зміни в печінці, серцево-судинній системі, нервовій системі, сухість шкіри при тривалому контакті | 4 | 140 |
| Олово | Ураження бронхів, викликає поліферативно-креточну реакцію в легенях. При тривалому впливі можливий пневмоконіоз | 3 | 10 |
| Свинець | При отруєнні спостерігається ураження нервової системи, крові, серцево-судинної системи, шлунково-кишкового тракту, статевої системи, порушення плинності вагітності | 1 | 0,01 |
| Вісмут | Подібно дії інших металів викликає пригнічення активності ферментів, викликає ембріотропну і гонадотропіну дію | 2 | 0,5 |
| Спирт етиловий | Має наркотичну і дратівну дію. Викликає зміни в печінці, серцево-судинній системі, нервовій системі, сухість шкіри при тривалому контакті | 4 | 1000 |
| Хлорид Цинку | Опіки шкіри та слизистих оболонок, головний біль, нудота. | 3 | 5 |

В якості припою використовується олов'яно-свинцевий припій марки ПОС-61 ГОСТ 21931-76, до складу якого входить олово (Sn) у кількості 60-62% і свинець (Pb) у кількості 38-40%. Як флюс використовується безкислотний флюс КЕ ГОСТ 1797-64, що складається із соснової каніфолі (СН-О-ОН) у кількості 15-28%, і етилового спирту (СН-ОН) у кількості 72-85%. Для видалення залишків флюсу застосовується спеціальна рідина для очищення плат, що складається з ізопропілового спирту та розчинника «Бензин калоша».

Оскільки очистка плат проводиться відносно рідко, то наявність в повітрі шкідливих речовин визначається переважно проведенням процесу пайки. Також оскільки ГДК для аерозолу свинцю в повітрі набагато менша в порівнянні з ГДК для олова, то розрахунки забруднення визначаються вмістом аерозолу свинцю в повітрі.

Зробимо розрахунок концентрації аерозолу свинцю. На ділянці пайки 2 робочих місця. Питоме утворення аерозолу свинцю при пайці паяльником потужністю 25Вт становить 0,02мг/100пайок. Концентрація аерозолу в атмосфері при ручній пайці:

$$C = 0.6 \cdot Y \cdot n \cdot t \cdot \frac{N}{V}$$

де: Y - питоме утворення свинцю, мг/100пайок

n - кількість пайок у хвилину, шт. ($n = 5$ шт.)

t - тривалість зміни, год. ($t = 8$ год.)

N - кількість робочих місць, де ведеться пайка, шт. ($N=2$)

V - обсяг приміщення, м³

Розраховуємо обсяг приміщення довжиною 5метрів, шириною 5метрів, та висотою 3 метри.

$$V = 5 \cdot 5 \cdot 3 = 75 \text{ м}^3$$

Розраховуємо концентрацію

$$C = 0.6 \cdot 0.02 \cdot 5 \cdot 8 \cdot \frac{2}{75} = 0.011 \left(\frac{\text{мг}}{\text{м}^3} \right)$$

Концентрація аерозолу свинцю дещо перевищує ГДК. Тому проведемо розрахунок вентиляції необхідної для забезпечення безпечного рівня ГДК.

Розрахуємо мінімально необхідне значення повітрообміну для забезпечення безпечної концентрації аерозолу свинцю в повітрі:

$$L_H = \frac{G}{c_{вид} - c_{пр}}, \text{ м}^3/\text{год},$$

де G – кількість аерозолу свинцю що виділяється, мг/год;

$c_{вид}$ – концентрація шкідливих речовин у повітрі, що видаляється, мг/м³

– не повинна перевищувати ГДК;

$c_{пр}$ – концентрація шкідливих речовин у повітрі, що подається в приміщення, мг/м³ – не повинна перевищувати 0,3 ГДК;

$$G = 0,06 \text{ мг/год}$$

$$c_{вид} = 0,01 \text{ мг/м}^3$$

$$c_{пр} = 0,003 \text{ мг/м}^3$$

$$L_H = \frac{0,06}{0,01 - 0,003} = 9 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Для забезпечення даного повітрообміну використаємо витяжку з малопотужним витяжним вентилятором з типовим значенням повітрообміну 100 м³/год. Витяжка буде розміщуватись над зоною паяння та на відстані не більше 2 м.

4.2.2 Вплив інфрачервоного випромінювання на організм людини при проведенні пайки ЕРЕ.

При виготовленні друкованих плат присутня дія розігрітого жала паяльника на робітника. Ця дія проявляється в електромагнітному випромінюванні інфрачервоного діапазону та в потоках гарячого сухого повітря.

ІЧ випромінювання спричиняє нагрівання оточуючих тіл (тепловий вплив).

Вплив ІЧ променів залежить від довжини хвилі. ІЧ випромінювання підрозділяється на три області: А, В, С. До області А відноситься випромінювання з довжиною хвилі 760–1500 нм, В — 1500–3000 нм, С — більш 3000 нм. Перша область має велику проникність через шкіру. Дія ІЧ променів при поглинанні їх у різних шарах шкіри приводить до її перегрівання, що обумовлює переповнення кровоносних судин кров'ю і посилення обміну речовин. Збільшується зміст фосфору і натрію в крові, посилюється секреторна функція шлунка, підшлункової і слинної залоз, розвиваються гальмівні процеси, зменшується нервово-м'язова збудливість. Підвищується серцебиття, відбувається підвищення максимального і зниження мінімального кров'яних тисків, підвищується температура тіла, підвищується кількість захворювань серцево-судинної системи й органів травлення.

Найбільш важкі ураження викликаються коротким ІЧ випромінюванням. Допустима щільність потоку енергії ІЧ випромінювання складає відповідно до ГОСТ 12.1.005–88 п.1.8 та ДСН 3.3.6.042–99:

Інтенсивність теплового опромінення працюючих від нагрітих поверхонь технологічного устаткування, освітлювальних приладів, інсоляції на постійному і непостійному робочому місцях не повинна перевищувати 35 Вт/м^2 при опроміненні 50% поверхні тіла і більш, 70 Вт/м^2 — при величині поверхні, що опромінюється, від 25% до 50% і 100 Вт/м^2 — при опроміненні не більш 25% поверхні тіла (табл. 4.2).

Інтенсивність теплового опромінення працюючих від відкритих джерел (нагрітий метал, скло, «відкрите» полум'я й ін.) не повинне перевищувати 140 Вт/м^2 , при цьому опроміненню не повинно піддаватися більш 25% поверхні тіла й обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту обличчя й очей. Допустимі норми опромінення приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Допустимі норми інфрачервоного випромінювання

| Області інфрачервоного випромінювання | Довжина хвилі, нм | Допустима щільність потоку енергії, Вт/м ² | Допустима інтегральна щільність потоку енергії випромінювання, Вт/м ² |
|---------------------------------------|-------------------|---|--|
| А | 760-1500 | 100 | 100 |
| В | 1500-3000 | 120 | |
| С | 3000-4500 | 120 | |

4.2.3 Електробезпека

Згідно з ГОСТ12.2007.6-75 розроблений пристрій відноситься до 2-го класу за електрозахистом, оскільки пристрій має подвійну робочу ізоляцію та виконаний в пластиковому корпусі. Також в лабораторії присутнє інше обладнання з наступними класами електрозахисту:

- Електровимірювальні прилади – 1 клас;
- ВДТ ПЕОМ (пристрій візуального відображення інформації) – 2 клас;
- Системні блоки комп'ютера – 1 клас.

Система електроживлення є 5-ти провідною з глухозаземленою нейтраллю та зануленням (тип ТМ-S).

Виконаємо розрахунок електромережі із зануленням на відключаючу здатність при аварійному режимі роботи електрообладнання

Розрахунок електромережі на вимикаючу здатність включає знаходження величини струму КЗ і розрахунок номінального струму спрацювання пристрою максимального струмового захисту.

Вихідні дані для розрахунку:

- $U_{\phi}=220$ В – фазна напруга;

- кабель трьохжильний $3 \times 1,5 \text{ мм}^2$ плюс $1 \times 0,85 \text{ мм}^2$, матеріал – алюміній ($\rho = 0,031 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$);
- $L = 150 \text{ м}$ – відстань від трансформатора до споживача;

Розрахуємо активний опір фазного та нульового проводів:

$$r_H = r_\phi = \frac{\rho \cdot L}{S_\phi} = \frac{0,031 \cdot 150}{1,5} = 3,1 \text{ (Ом)}$$

Струм однофазного КЗ знаходиться по формулі:

$$I_{K3} = \frac{U_\phi}{r_\phi + r_H + r_u/3} = \frac{220}{3,1 + 3,1 + 0,2} = 34,4 \text{ (А)},$$

де $r_u/3 = 0,2 \text{ Ом}$ – розрахований опір фазного трансформатора потужністю 10 кВт, r_H – опір нульового дроту на ділянці від трансформатора до розетки, r_ϕ – опір фазного дроту на тій же ділянці.

Номінальний струм спрацювання автомату струмового захисту розраховується за формулою (K – необхідна кратність струму КЗ до струму спрацювання автомату струмового захисту):

$$I_{ном} \leq \frac{I_{K3}}{K} \leq \frac{34,4}{1,4} \leq 24,6 \text{ (А)}$$

З розрахунків видно, що при однофазному КЗ номінальний струм спрацювання автомату захисту повинен бути меншим 24 А.

В робочому приміщенні використовуються автомати струмового захисту з $I_{ном} = 15 \text{ (А)}$, що задовільняє приведеній вище вимозі.

При однофазному КЗ нульовий провід і з'єднаний з ним корпус електроустановки за час спрацювання максимального струмового захисту знаходяться під напругою ($U_{пр}$) відносно землі:

$$U_{дом} = I_{K3} \cdot r_H = 34,4 \cdot 3,1 = 105,1 \text{ (В)}$$

Розрахована напруга $U_{дом} < U_{дом.дон.}$ у відповідності з ГОСТ 12.1.038-88 при $t < 0,2 \text{ с}$ ($U_{дом.дон.} = 250 \text{ В}$).

4.2.4 Освітлення робочого місця

У розглянутому приміщенні використовується система штучного загального рівномірного освітлення. Як джерело світла використовуються люмінесцентні лампи низького тиску ЛБ80 у кількості 6 штук, розміщені в шести світильниках 101-2x80-02, розташовані на стелі в два ряди.

Перевіримо освітленість, яка забезпечується загальним рівномірним штучним освітленням. Для визначення освітленості застосуємо метод коефіцієнта використання світлового потоку:

$$E = \frac{N \cdot \Phi_{\text{л}} \cdot \eta}{S \cdot K_3 \cdot Z}$$

де: $N=6$ - кількість світильників у приміщенні; $\Phi_{\text{л}}$ - 7200 Лм - світловий потік світильника; S - 25 м² площа освітлюваного приміщення; η - коефіцієнт використання світлового потоку. Визначається в залежності від індексу приміщення і коефіцієнтів відображення стелі $p_1=0,7$, стін $p_2=0,5$ і підлоги $p_3=0,1$; $K_3=1,5$ - коефіцієнт запасу. При використанні люмінесцентних ламп у приміщеннях з повітряним середовищем, що містить менш 1мг/м пилу; $Z=1,1$ - коефіцієнт нерівномірності освітлення.

Обчислюємо індекс приміщення:

$$i = \frac{S_3}{h(l+b)}$$

де $l = 5$ м - довжина приміщення; $b = 5$ м - ширина приміщення; $h=3$ м - висота підвісу світильників;

$$i = \frac{25}{3 \cdot (5 + 5)} = 0,83$$

За табличними даними визначаємо:

$$\eta = 0,55$$

Тоді:

$$E = \frac{6 \cdot 7200 \cdot 0,55}{25 \cdot 1,5 \cdot 1,1} = 550 \text{ Лк}$$

Норма загального освітлення робочих місць складає 300 Лк, тому ДБН В.2.5-28-2006 виконуються. Розряд зорової роботи 3, підрозряд Б. Мінімальний об'єкт розпізнання 0,2-0,5 мм.

На робочому місці монтажника комбіноване освітлення повинне забезпечити освітленість $E_{норм} = 750$ Лк. Загальне освітлення забезпечує 550 Лк, місцеве повинно бути $E_{норм} - E_{заг} = 750 - 550 = 200$ Лк. Застосуємо джерело місцевого освітлення Л201-2x80-02.

Перевіримо, чи забезпечить даний світильник необхідну освітленість:

$$E = \frac{N \cdot n \cdot \Phi_{л} \cdot L \cdot \mu \cdot \psi}{1000 \cdot K_3}$$

де: E - освітленість, забезпечувана місцевим світильником; N - число світильників; $K_3 = 1,5$ - коефіцієнт запасу; $n = 2$ - число ламп у світильнику; $\Phi_{л} = 3660$ Лм - світловий потік лампи ЛД80; $\mu = 1,2$ - коефіцієнт, що враховує збільшення освітленості від навколишніх предметів; $L = 100$ - умовна освітленість за графіком; $\psi = 1$ - враховує кут нахилу робочої площини;

$$E = \frac{1 \cdot 1 \cdot 3660 \cdot 100 \cdot 1,2 \cdot 1}{1000 \cdot 1,5} = 290 \text{ Лк}$$

Комбіноване освітлення з джерелом Л201-2x80-02 забезпечить необхідну освітленість на робочому місці монтажника згідно вимог ДБН В.2.5-28-2006.

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Безпека в НС регламентується ПЛАС (планом локалізації та ліквідації аварійних ситуацій). Основними складовими частинами ПЛАС є розробка технічних рішень та організація заходів щодо оповіщення, евакуації та дій персоналу при виникненні НС, а також визначення основних заходів з пожежної безпеки.

4.3.1 Вимоги щодо організації ефективної роботи системи оповіщення персоналу у разі виникнення надзвичайної ситуації

Розміри зон оповіщування, черговість оповіщування та час початку оповіщування людей в окремих зонах визначаються, виходячи з умов забезпечення безпечної та своєчасної евакуації людей у разі виникнення НС.

Оповіщування про НС та управління евакуацією людей здійснюється одним з наступних способів або їх комбінацією:

- поданням звукових і (або) світлових сигналів в усі виробничі приміщення будівлі з постійним або тимчасовим перебуванням людей;
- трансляцією текстів про необхідність евакуації, шляхи евакуації, напрямки руху й інші дії, спрямовані на забезпечення безпеки людей;
- трансляцією спеціально розроблених текстів, спрямованих на запобігання паніці й іншим явищам, що ускладнюють евакуацію;
- розміщенням знаків безпеки на шляхах евакуації згідно з ДСТУ ISO 6309;
- ввімкненням евакуаційних знаків "Вихід";
- ввімкненням евакуаційного освітлення та світлових покажчиків напрямку евакуації.

Кількість оповіщувачів, їх розміщення та потужність повинні забезпечувати необхідну чутність у всіх місцях постійного чи тимчасового перебування людей.

У місцях, де є небезпека механічного ушкодження оповіщувачів, повинен бути забезпечений їх захист, що не порушує працездатності оповіщувачів. Встановлення звукових та мовних оповіщувачів у виробничих приміщеннях повинно виключати можливість концентрації та нерівномірного розподілу звуку.

Оповіщувачі повинні підключатися до мережі без роз'ємних пристроїв і не мати регуляторів гучності. Сигнали оповіщення про пожежу повинні відрізнятися від сигналів іншого призначення. Комунікаційні системи оповіщення людей про пожежу можуть проектуватися суміщеними з радіотрансляційною мережею будівлі.

Електропостачання, заземлення, занулення, вибір та прокладання мереж оповіщення приймаються згідно з вимогами до систем пожежної сигналізації за ДБН В.2.5-56-2014 "Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд".

Управління системою оповіщення слід передбачати з приміщення пожежного поста, диспетчерської або іншого спеціального приміщення. Вимоги до такого приміщення приймаються за аналогією з вимогами до приміщень чергового персоналу з ДБН В.2.5-56-2014.

4.3.2 Обов'язки та дії персоналу у разі виникнення НС

У разі виявлення ознак НС працівник, який їх помітив, повинен:

- негайно повідомити про це засобами зв'язку органи ДСНС та Державну пожежну охорону, вказати при цьому адресу кількість поверхів, місце виникнення НС, наявність людей, а також своє прізвище;
- повідомити про НС керівника, адміністрацію, пожежну охорону підприємства;
- організувати оповіщення людей про НС;
- вжити заходів щодо евакуації людей та матеріальних цінностей;
- вжити заходів щодо ліквідації наслідків НС з використанням наявних засобів.

Керівник та пожежна охорона установи, яким повідомлено про виникнення пожежі, повинні :

- перевірити, чи викликано підрозділи ДСНС та Державна пожежна охорона;
- вимкнути у разі необхідності струмоприймачі та вентиляцію;
- у разі загрози життю людей негайно організувати їх евакуацію та їх рятування, вивести за межі небезпечної зони всіх працівників, які не беруть участь у ліквідації НС;
- перевірити здійснення оповіщення людей про НС;
- забезпечити дотримання техніки безпеки працівниками, які беруть участь у ліквідації НС;

– організувати зустріч підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони, надати їм допомогу у локалізації та ліквідації пожежі.

Після прибуття підрозділів ДСНС та Державної пожежної охорони повинен бути забезпечений безперешкодний доступ їх до місця, де виникла пожежа.

4.3.3 Пожежна безпека та безпека в надзвичайних ситуаціях

Розглянуте приміщення відповідно до ОНТП 24 - 86 НАПБ Б.03.002-2007 можна віднести до категорії “В” по вибухопожежній небезпеці, а робочі зони приміщення згідно з ПБЕ та ПУЕ (ДНАОП 0.00-1.32-01) відносяться до класу П-Па по пожежній небезпеці, тобто це приміщення у якому знаходяться тверді і волокнисті легкозаймисті речовини (дверні рами, двері, меблі і т.д.).

Оскільки в розглянутому приміщенні знаходиться коштвна апаратура , то пожежа може привести до великих матеріальних утрат. Отже, проведення робіт із створення умов, при яких імовірність виникнення пожежі зменшується, має важливе значення.

Можливими причинами виникнення пожежі можуть бути :

- коротке замикання проводки;
- паління в недозволених місцях, користування побутовими електронагрівальними приладами.

У зв'язку з цим відповідно до ПБЕ та ПУЕ необхідно передбачити наступні заходи:

1) ретельна ізоляція всіх струмоведучих провідників до робочих місць; періодичний огляд і перевірка ізоляції;

2) суворе дотримання норм протипожежної безпеки на робочому місці.

Проводяться організаційно-технологічні заходи (заборона паління, інструктаж). На випадок виникнення пожежі забезпечена можливість безпечної евакуації людей через евакуаційні виходи. У приміщенні є план евакуації.

Мінімальний час евакуації відповідає вимогам СНиП 2.01.02-85, а максимальна віддаленість робочих місць від евакуаційних виходів відповідає

вимогам СНиП 2.09.02-85. Необхідна кількість евакуаційних виходів, ширина проходів і ступінь вогнестійкості також відповідає вимогам СНиП 2.01.02- 85 і СНиП 2.09.02- 85 та ДБН В.1.1-7-2003.

Згідно ДСТУ 3675-98 та ISO3941-77 у приміщенні лабораторії знаходяться:

- вогнегасник ОУБ-3 – 1шт.;
- вогнегасник ОП-1 "Момент" – 1шт.

Така кількість вогнегасників відповідає вимогам ДСТУ 3675-98 та ISO3941-87, якими передбачене обов'язкова наявність двох вогнегасників на 100 м² площі підлоги для приміщень.

По вогнестійкості приміщення лабораторії відноситься до II ступеня вогнестійкості (ГОСТ 12.1.004-76), тобто механічні конструкції в приміщенні, стіни виконані з неспалимих матеріалів. Робочі місця для виконання робіт у положенні сидячи, організовані відповідно до ГОСТ 12.2.032- 78. Висота робочого столу вибирається рівною 0.8 м.

На випадок виникнення пожежі на сходовій площадці за приміщенням установлений пожежний щит, обладнаний пожежним інвентарем і вогнегасником марки ОУ–5 відповідно до вимог ДСТУ 3675-98 та ISO3941- 77 (вогнегасник вуглекислотний, ручний) для гасіння загорянь різних матеріалів і установок під напругою до 1000В і хімічні, пінні ОХП-10 вогнегасник для гасіння твердих матеріалів.

Згідно ОНТП 24-86 і ГОСТ 12.4.009-83 у пожежний щит входять:

- азбест;
- шухляда з піском;
- пожежний інвентар.

У робочому приміщенні виконуються усі вимоги по пожежонебезпеці відповідно до вимог НАПБ.А.01.001- 2004 “Правила пожежної безпеки в Україні”.

5 РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Даний розділ присвячено висвітленню маркетингових аспектів створення стартап-проекту. Метою розділу є проведення маркетингового аналізу для оцінки та формування заходів із ринкового впровадження, а також можливих напрямків реалізації цього впровадження.

5.1 Опис ідеї проекту

В підрозділі проведено аналіз змісту ідеї, наведено можливі напрямки застосування, показано основні вигоди які можна отримати використовуючи розроблений метод та відмінності від існуючих методів. Ідею стартап-проекту описано в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 — Опис ідеї стартап-проекту

| Зміст ідеї | Напрямки застосування | Вигоди для користувача |
|---|-----------------------|---|
| Розробка пристрою вимірювання параметрів напівпровідників та формування їх моделі САПР. | Електроніка | Підвищення ефективності проектування РЕА. |

Основним конкурентом може бути пристрій, який здатний одночасно вимірювати характеристики напівпровідників та формувати їх параметри моделі САПР. Опишемо сильні та слабкі сторони проекту в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 — Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № п/п | Техніко-економічні характеристики ідеї | Товари конкурентів | | W (слабка сторона) | N (нейтральна сторона) | S (сильна сторона) |
|-------|--|--------------------|-----------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | | Мій проєкт | Конкурент | | | |
| 1 | Простота | | | | | ✓ |
| 2 | Дешевизна | | | | | ✓ |
| 3 | Швидкодія | | | | | ✓ |

5.2 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу проводиться аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту.

Для реалізації пропонується такий варіант розробки пристрою:

1. Проектування пристрою, який буде підключатися до ПК і керуватися програмою з нього. Проектування включає розробку та виготовлення друкованої плати, монтаж компонентів, монтаж друкованого вузла в корпус. Написання програми керування пристроєм для ПК та розрахунку параметрів моделі САПР. Інтеграція алгоритмів вимірювання в програму ПК.
2. Проектування пристрою, який буде підключатися до ПК і керуватися програмою з нього. Проектування включає розробку та виготовлення друкованої плати, монтаж компонентів, монтаж друкованого вузла в корпус. Написання програми керування пристроєм для ПК та розрахунку параметрів моделі САПР. Інтеграція алгоритмів вимірювання в програму мікроконтролера що керує пристроєм.

Таблиця 5.3 — Технологічна здійсненність проекту

| № п/п | Ідея проекту | Технології її реалізації | Наявність технології | Доступність технології |
|---|---|--------------------------|----------------------|------------------------|
| 1 | Розробка пристрою вимірювання параметрів напівпровідників та формування їх моделі САПР. | I-ий варіант | Так | Так |
| 2 | | II-ий варіант | Так | Так |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: I-ий варіант | | | | |

Пристрій та його програмне забезпечення було реалізовано у вигляді прототипу. Підтверджено роботоздатність системи.

5.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В межах цього підрозділу проводиться визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту. Визначення ринкових можливостей дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Таблиця 5.4 — Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

| № п/п | Показники стану ринку | Характеристика |
|-------|---|----------------|
| 1 | Кількість головних гравців, од | 1 |
| 2 | Загальний обсяг продаж, ум. од. | |
| 3 | Динаміка ринку | Зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу | Невідома |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Існують |
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі, % | Невідома |

За результатами аналізу важко зробити висновок щодо привабливості для входження за попереднім оцінюванням.

Визначимо потенційні групи клієнтів.

Таблиця 5.5 — Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| № п/п | Потреба, що формує ринок | Цільова аудиторія | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару |
|-------|---|--------------------|---|---|
| 1 | Вимірювання параметрів напівпровідників та формування їх моделі САПР. | Науковці, інженери | Невідомі | Простота використання, малі габарити, дешевизна |

Проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають.

Таблиця 5.6 — Фактори загроз

| Фактор | Зміст загрози | Можлива реакція компанії |
|----------------|--|--------------------------|
| Новий пристрій | Впровадження функціонального аналогу пристрою з низькою вартістю та габаритами | Вихід з ринку |

Таблиця 5.7 — Фактори можливостей

| № п/п | Фактор | Зміст можливості | Можлива реакція компанії |
|-------|------------------------------|---|-------------------------------|
| 1 | Новий модифікований пристрій | Розширення функціоналу, інтеграція ВЧ генератора для вимірювання частотних параметрів | Розроблення цього функціоналу |

Проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку.

Таблиця 5.8 — Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| Особливості конкурентного середовища | В чому проявляється дана характеристика | Вплив на діяльність підприємства |
|---|--|----------------------------------|
| Тип конкуренції – чиста | Ніхто не може впливати на загальну ситуацію на ринку | Не значний |
| За рівнем конкурентної боротьби – національне | Дане підприємство відомо по усьому світу | Значний |
| За галузевою ознакою – внутрішньогалузева | Конкуренція виконується в рамках однієї галузі | Значний |
| Конкуренція за видами товарів – невідомо | | |
| За характером конкурентних переваг – цінова | Товар даного підприємства має дуже високу вартість | Значний |
| За інтенсивністю – невідомо | | |

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції у галузі.

Таблиця 5.9 — Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

| | | | | | |
|------------------|---|------------------------------|---------------|----------|------------------|
| Складові аналізу | Прямі конкуренти в галузі | Потенційні конкуренти | Постачальники | Клієнти | Товари-замінники |
| | Схема з ширшим функціоналом | Розроблюваний пристрій | Невідомо | Невідомо | Невідомо |
| Висновки | Маючи чисте положення на ринку розробник цього пристрою не буде звертати увагу на конкурентів | Є можливість виходу на ринок | Невідомо | Невідомо | Невідомо |

За результатами аналізу можна зробити висновок, що працювати на даному ринку, зважаючи на чисту конкурентну ситуацію, потрібно. Для поширення продукту він повинен володіти рядом факторів, які відрізняють його від існуючого конкурента.

Перелічимо фактори конкурентоспроможності

Таблиця 5.10 — Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

| № п/п | Фактор конкурентоспроможності | Обґрунтування |
|-------|-------------------------------|---|
| 1 | Простота | Дана розробка не вимагає від користувача особливих знань у галузі |
| 2 | Дешевизна | Поширюється безкоштовно і кожний має можливість користуватися нею |
| 3 | Швидкодія | Результат значно кращий, ніж у продукті конкурента |

Проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту.

Таблиця 5.11 — Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

| № п/п | Фактор конкуренто-спроможності | Бали 1-20 | Рейтинг товарів –конкурентів у порівнянні з проектом, що розробляється | | | | | | |
|----------|--------------------------------|--------------|--|----|----|---|----|----|----|
| | | | -3 | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 | +3 |
| 1 | Простота | | | | | | | | |
| 2 | Дешевизна | | | | | | | | |
| 3 | Швидкодія | | | | | | | | |

Проведемо SWOT-аналіз.

Таблиця 5.12 — SWOT-аналіз стартап-проекту

| | |
|---|---|
| Сильні сторони: Простота, Дешевизна, Швидкодія | Слабкі сторони: Невідома компанія, Відсутність стартового капіталу |
| Можливості: Розширення алгоритму, Нові технології | Загрози: Продукти-замінники |

З огляду на SWOT-аналіз можна прийти до висновку що нема потреби розробляти альтернативи ринкового впровадження цього проекту.

5.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку, а саме опис цільових груп потенційних споживачів.

Таблиця 5.14 — Вибір цільових груп потенційних споживачів

| | | | | |
|--|---|--|--------------------------------------|--------------------------|
| Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів | Готовність споживачів сприйняти продукт | Орієнтовний попит в межах цільової групи | Інтенсивність конкуренції в сегменті | Простота входу у сегмент |
| Науковці, інженери | Готові | Високий | У сегменті мала конкуренція | Легко |

Які цільові групи обрано: інженери.

Для роботи в обраних сегментах ринку сформулюємо базову стратегію розвитку.

Таблиця 5.15 — Визначення базової стратегії розвитку

| | | |
|----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Стратегія охоплення ринку | Ключові конкурентоспроможні позиції | Базова стратегія ринку |
| Диференційований маркетинг | Простота, дешевизна, швидкодія | Стратегія диференціації |

Виберемо конкурентну поведінку:

Таблиця 5.16 — Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| | | | |
|--|--|--|----------------------------------|
| Чи є проект «першопрохідцем» на ринку? | Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів? | Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкуренту? | Стратегія конкурентної поведінки |
| Так | Ні | Ні | Заняття конкурентної ніші |

Розробимо стратегію позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції, за яким споживачі мають ідентифікувати проект.

Таблиця 5.17 — Визначення стратегії позиціонування

| № п/п | Вимоги до товару цільової аудиторії | Базова стратегія розвитку | Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту | Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту |
|-------|-------------------------------------|---------------------------|--|---|
| 1 | Точність | | | |
| 2 | Швидкодія | | | |

5.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач.

Таблиця 5.18 — Визначення ключових переваг потенційного товару

| № п/п | Потреба | Вигода, яку пропонує товар | Ключові переваги перед конкурентами |
|-------|--|--|---|
| 1 | Пристрій вимірювання, програма керування і розрахунку параметрів | Пристрій вимірювання та програмне забезпечення | Можливість автоматичного розрахунку параметрів моделі САПР. |

Таблиця 5.19 — Опис трьох рівнів моделі товару

| Рівні товару | Сутність та складові |
|--------------------------------|--|
| 1. Товар за задумом | Портативний пристрій що працює з ПК |
| 2. Товар у реальному виконанні | Властивості: |
| | 1. Простота |
| | 2. Швидкодія |
| | Якість: перевірка на багатьох функціях |
| | Пакування: пластиковий корпус |
| | Марка: відсутня |
| 3. Товар із підкріпленням | До продажу: невідомо |
| | Після продажу: невідомо |

Товар не буде якимось чином захищатись від копіювання та буде поширюватись як є.

Визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на товар.

Таблиця 5.20 — Визначення меж встановлення ціни

| Рівень цін на товари-замінники | Рівень цін на товари-аналоги | Рівень доходів цільової групи споживачів | Верхня та нижня межі ціни на товар |
|--------------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|
| 100-150 тис. ум. од. | До 10 тис ум. од. | Високий | Безкоштовно |

Визначимо оптимальну систему збуту.

Таблиця 5.21 — Формування системи збуту

| № п/п | Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів | Функції збуту, які має виконувати постачальник товару | Глибина каналу збуту | Оптимальна система збуту |
|-------|---|---|----------------------|--------------------------|
| 1 | Невідома | Вільний доступ до товару | Невідома | Вільний доступ до товару |

Розробимо концепцію маркетингових комунікацій.

Таблиця 5.22 — Концепція маркетингових комунікацій:

| № п/п | Специфіка поведінки цільових клієнтів | Канали комунікацій, якими користуються клієнти | Ключові позиції, обрані для позиціонування | Завдання рекламного повідомлення | Концепція рекламного звернення |
|-------|---------------------------------------|--|--|----------------------------------|--|
| 1 | Невідома | Інтернет, наукові публікації | Можливості проекту | Донести про можливості проекту | Донесення про можливості та сильні сторони проекту |

5.6 Висновки

За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок, що на ринку буде попит на таку продукцію, тобто є можливість ринкової комерсyalізації проекту. Проте метою цього проекту не є матеріальне збагачення, тому продукт буде поширюватись вільно, безкоштовно та без обмежень, отже комерсyalізація даного проекту не має сенсу.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертації розроблено та спроектовано пристрій для дослідження вольт-амперних характеристик напівпровідників, що є значно вдосконаленим аналогом характерографа розробленого в бакалаврській роботі. Вдосконалення пристрою дозволило підвищити точність вимірювання і як результат отримувати більше параметрів математичної моделі Гуммеля-Пуна та з більшою точністю. В дисертації було допрацьовано програмний алгоритм отримання параметрів моделі з вимірних характеристик напівпровідників. Було інтегровано алгоритм розрахунку параметрів моделі в графічний інтерфейс керування пристроєм. Завдяки цьому розширився функціонал програми керування і користувач має змогу вимірювати не тільки вольт-амперні характеристики в графічному вигляді, а й формувати основні параметри математичної моделі Гумеля-Пуна біполярного транзистора. електричні параметри напівпровідника.

Було розроблено алгоритм вимірювання температурних характеристик без використання нагрівачів та вимірювачів температури, оскільки нагріти транзистор можна виділяючи потужність на колекторі, а значення температури кристалу кремнію можна оцінити використовуючи значення температурного опору кристал-корпус. При цьому необхідно лише зовнішнє повітряне охолодження для нівелювання температурної залежності процесу повітряної конвекції.

Також розроблено алгоритм вимірювання частотних характеристик транзистора з використанням зовнішнього генератора та додаткової приставки. Це дозволяє отримувати не лише статичні, а й динамічні параметри. Вихідними даними при вимірюванні частотних характеристик є модуль відношення підсилення транзистора на даній частоті до значення низькочастотного підсилення та зсув фаз у градусах між вхідним та вихідним сигналами на відповідних електродах транзистора.

Розроблений пристрій буде корисним в навчальному процесі. Він дозволяє вимірювати характеристики не тільки транзисторів, а й діодів, стабілітронів, тиристорів. Тому планується його використання у відповідних лабораторних роботах, що дозволить проводити вимірювання з меншою трудоемкістю та з більшим функціоналом.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. R. Schuster «Transistor curve traser» / R. Schuster // «Elector» – 2009 – №2 – С. 24 – 31.
2. Стенд лабораторный LESO3 для изучения полупроводниковых приборов — Режим доступа: <https://lektsii.org/14-66994.html> — Назва з екрану.
3. FT232R USB UART IC Datasheet / FTDI Inc — Режим доступа: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf — Назва з екрану.
4. Микроконтроллеры: краткий обзор — Режим доступа: http://www.myrobot.ru/stepbystep/mc_meet.php — Назва з екрану.
5. Браун М. Источники питания. Расчет и конструирование.: Пер. с англ. – К.: «МК-Пресс», 2007. – 288 с.
6. Ошибки измерительных усилителей — Режим доступа: http://www.compitech.ru/html.cgi/arhiv/03_05/stat_36.htm — Назва з екрану.
7. Precision Measurement without ground offset — Режим доступа: <http://www.mosaic-industries.com/embedded-systems/microcontroller-projects/measurement-techniques/instrumentation-amplifier-ground-loop-isolator> — Назва з екрану.
8. Грицевич І.Р. Прилад для дослідження напівпровідникових елементів / І.Р.Грицевич, В.О.Піддубний// Міжн. наук.-техн. конф. РТПСАС 2016 «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». — Київ, 2016. — с. 63 – 65.
9. Бадриев И. Б. Разработка графического пользовательского интерфейса в среде MATLAB. Учебное пособие / В. В. Бандеров, О. А. Задворнов. – Казань: Казанский государственный университет, 2010. – 113с.
10. Транзисторы КТ808, 2Т808 – параметры, маркировка, расположение выводов — Режим доступа: <http://elektrikaetoprosto.ru/ct808.html> — Назва з екрану.
11. Амелина М.А Программа схемотехнического моделирования MicroCap 8.0 / Амелина М.А., Амелин С.А. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — с. 345 – 354.
12. Искусство схемотехники. Смещение в схеме с общим эмиттером — Режим доступа: <http://www.skilldiagram.com/gl2-13.html> — Назва з екрану.
13. Искусство схемотехники. Дифференциальные усилители — Режим доступа: <http://www.skilldiagram.com/gl2-18.html> — Назва з екрану.
14. A. S. Zoolfakar et N. A. Shahrol, «Modelling of NPN Bipolar Junction Transistor Characteristics Using Gummel Plot Technique », in 2010

International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2010, p. 396 – 400.

15. F. Sischka. Gummel-Poon bipolar model. Model description. Parameter extraction. / Agilent Technologies GmbH, Munich.
16. Волков Е. А. Методы решения нелинейных уравнений и систем. Метод деления отрезка пополам // Численные методы. — Учеб. пособие для вузов. — 2-е изд., испр. — М.: Наука, 1987. — С. 190. — 248 с.
17. Влияние температуры на работу биполярного транзистора — Режим доступа: <https://helpiks.org/2-88223.html> — Назва з екрану.

ДОДАТОК А

ПОКРАЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ СИМУЛЯЦІЇ ЕЛЕКТРОННИХ СХЕМ ШЛЯХОМ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ТРАНЗИСТОРІВ

Грицевич І. Р.

(Науковий керівник Піддубний В. О., к.т.н., доцент)

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Радіотехнічний факультет

При проектуванні РЕА виникає необхідність налагодження апаратури спроектованої в системах автоматичного проектування (САПР). Це викликано тим, що математична модель транзистора, яка використовується в симуляторах САПР, таких як Micro-Cap, OrCAD, Multisim та ін., має усереднені параметри [1]. На практиці ці параметри часто відрізняються від параметрів конкретного компоненту. В симуляторі ці параметри доступні розробнику для редагування, тому є можливість покращити результат симуляції в разі наявності достовірних параметрів компоненту, що можуть бути виміряні експериментально. З цією метою ведеться розробка приладу [2], який дозволяв би отримувати реальні параметри для кожного компоненту, оскільки параметри в бібліотеці є середньостатистичними. Також може статися так, що параметри необхідного компоненту взагалі відсутні в бібліотеці САПР, в цьому разі їх можна замінити на параметри вже відомого компонента, який максимально наближений за електричними характеристиками, і в якому основні параметри будуть підкореговані за результатами експериментальних вимірів до реальних значень. Прилад (характерограф), який описаний в [2], якраз і дозволяє це зробити.

Розглянемо модель (рис.1) біполярного транзистора, яка найчастіше використовується в симуляторах. Це модель Гуммеля-Пуна:

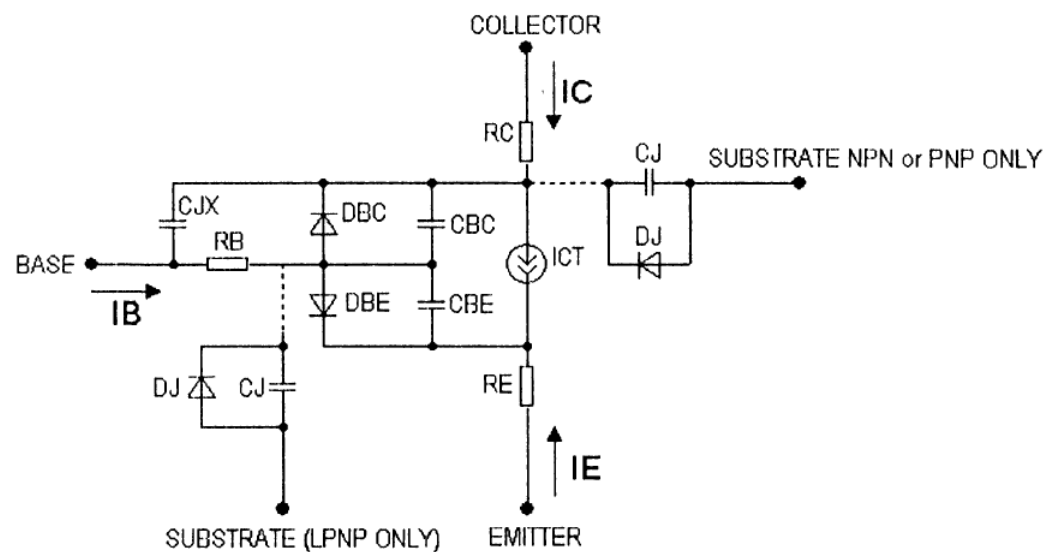


Рис 1. Електрична схема моделі Гуммеля-Пуна біполярного транзистора в симуляторі Micro-Cap 8.

Рівняння, що описують цю модель біполярного транзистора, є досить громіздкими і включають багато параметрів моделі [1]. Це в першу чергу спричинено тим, що ці рівняння враховують різні режими роботи транзистора. Але як відомо, в аналоговій схемотехніці транзистори рідко використовують в режимі насичення та інверсному режимі. Приведемо спрощені визначення для струмів бази та колектора для прямого активного режиму біполярного транзистора. Розглядаємо лише статичні процеси.

Струм бази визначається як:

$$I_B = IS \cdot \frac{\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NF \cdot V_T}\right) - 1}{BF} + ISE \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NE \cdot V_T}\right) - 1 \right),$$

де I_B — струм бази, V_{BE} — напруга база-емітер, I_C — струм колектора, V_T — термальна напруга, IS — струм насичення, NF — коефіцієнт емісії для нормального режиму, RE — опір емітера, BF — ідеальний коефіцієнт підсилення струму бази, ISE — струм насичення протікання, NE — коефіцієнт емісії струму протікання емітерного переходу.

Струм колектора визначається як:

$$I_C = IS \cdot \frac{\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NF \cdot V_T}\right)}{QB},$$

де

$$QB = \frac{Q1 \cdot (1 + \sqrt{1 + 4 \cdot Q2})}{2},$$

а також

$$Q1 = \frac{1}{1 + \frac{V_{CE}}{VAF}}, \quad Q2 = IS \cdot \frac{\exp\left(\frac{V_{BE} - RE \cdot I_C}{NF \cdot V_T}\right) - 1}{IKF},$$

де V_{CE} — напруга колектор-емітер, VAF — напруга Ерлі, IKF — струм початку спаду залежності BF від струму колектора.

З даних виразів виділяємо ключові параметри моделі Гуммеля-Пуна.

IS — струм насичення при $27^\circ C$.

BF — ідеальний коефіцієнт підсилення струму бази при $27^\circ C$.

NF — коефіцієнт емісії (неідеальності) для нормального режиму.

VAF — напруга Ерлі для нормального режиму.

IKF — струм початку спаду залежності BF від струму колектора.

RE — опір емітера.

Значення параметрів ISE , NE залишаємо без змін, тобто тими, що надані в бібліотеці, оскільки вони вимагають вимірювань в діапазоні дуже низьких струмів бази і колектора.

Отже ми маємо 6 ключових параметрів моделі. Саме ці параметри на практиці мають найбільший розкид для транзисторів одного типу і тому їх значення повинні бути підкореговані в результаті проведення експериментальних вимірювань а потім внесені в базу даних симулятора.

Параметри NF , RE , IS , BF , IKF можуть бути отримані рішенням систем рівнянь, що пов'язують експериментальні значення I_B , I_C та V_{BE} . Параметр VAF знаходиться з залежності I_C від напруги V_{CE} . Також можна знайти шукані величини графічно, маючи графік Гумеля [3] та вихідну вольт-амперну характеристику транзистора. В свою чергу ці характеристики будуть отримані за допомогою характерографа і збережені у вигляді масивів значень на комп'ютері. Використовуючи масив цих експериментальних відліків програма може автоматично вираховувати параметри моделі транзистора і представляти в зручному для користувача вигляді. Таким чином можна отримати всі необхідні характеристики напівпровідникових компонентів для формування математичної моделі, та подальшого використання їх в САПР

Приведемо теоретичні та експериментальні параметри транзистора BD139 (див. табл. 1):

Таблиця 1

Результати порівнянь параметрів моделі та експериментально виміряних

| Параметр | NF | RE [Ом] | IS [А] | BF | IKF [А] | VAF [В] |
|----------|-------|-----------|------------------------|-------|-----------|-----------|
| Теор. | 1,002 | 0,366 | $10 \cdot 10^{-15}$ | 200 | 0,560 | 100 |
| Експ. | 0,788 | 0,174 | $10,45 \cdot 10^{-15}$ | 157,3 | 0,361 | 103 |

Як бачимо параметри компоненту можуть значно відрізнятися від заданих в бібліотеці САПР.

Таким чином в даній роботі було проведено аналіз, які саме параметри математичної моделі транзистора є ключовими. Показано, що експериментально виміряні характеристики конкретного компоненту, що буде використовуватися в схемі суттєво відрізняються від закладених в базі даних, тому їх корегування дозволить підвищити достовірність результату симуляції. Це в свою чергу буде гарантією того, що виготовлений пристрій, побудований на основі схеми розрахованої в САПР буде працювати з заданими характеристиками без додаткового налаштування.

Література

1. Амелина М.А Программа схемотехнического моделирования MicroCap 8.0 / Амелина М.А., Амелин С.А. — М.: Горячая линия-Телеком, 2007. — с. 345 – 354.
2. Грицевич І.Р. Прилад для дослідження напівпровідникових елементів / І.Р.Грицевич, В.О.Піддубний// Міжн. наук.-техн. конф. РТПСАС 2016 «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». — Київ, 2016. — с. 63 – 65.
3. A. S. Zoolfakar et N. A. Shahrol, «Modelling of NPN Bipolar Junction Transistor Characteristics Using Gummel Plot Technique », in 2010 International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation (ISMS), 2010, p. 396 – 400.

КОНСТРУЮВАННЯ РАДІОЕЛЕКТРОННОЇ АПАРАТУРИ РОЗРОБЛЕНОЇ В СИСТЕМІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗ ДОДАТКОВОГО НАЛАШТУВАННЯ

Грицевич І. Р., магістрант, Піддубний В. О., к.т.н. доцент.

Національний технічний університет України

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ,
Україна*

При проектування радіоелектронної апаратури широко використовуються системи автоматизованого проектування (САПР) такі як Micro-Cap, OrCAD, Multisim та ін. Всі вони для опису транзисторів використовують їх математичні моделі. Найбільш розповсюдженою в системах САПР для опису параметрів біполярних транзисторів є модель Гуммеля-Пуна [1]. В ній використовується біля 20 незалежних параметрів. Така кількість параметрів обумовлена в першу чергу тим, що рівняння, які описують математичну модель, враховують різні режими роботи транзистора. Але як відомо, в аналоговій схемотехніці транзистори рідко використовують в режимі насичення та інверсному режимі, тому при проектуванні аналогових пристроїв можна розглядати лише активний режим роботи транзистора, а це призводить до значного зменшення визначальних параметрів. Ними є:

IS - струм насичення при температурі 27°C.

BF - ідеальний коефіцієнт підсилення струму бази при 27°C.

NF - коефіцієнт емісії (неідеальності) для нормального режиму.

VAF - напруга Ерлі для прямого активного режиму.

IKF - струм початку спаду залежності BF від струму колектора.

RE - опір емітера.

Саме ці параметри на практиці мають найбільший розкид для транзисторів одного типу, а в базі даних САПР заведені середньостатистичні, усереднені їх значення. Тому на етапі проектування допускаються помилки, які спричиняються розбіжностями параметрів реальних елементів відносно заведених в базу даних. Тому достовірна інформація про кожен використаний елемент вкрай необхідна і описувати його математичну модель в САПР доцільно параметрами реальних елементів, що будуть використовуватися в схемі. Це дозволить покращити результат симуляції в разі наявності достовірних параметрів компоненту, що можуть бути виміряні експериментально, та створювати таку схему, яка не вимагає подальшого налагодження.

З цією метою розроблено лабораторний макет приладу, який дозволяє отримувати реальні параметри для кожного компоненту, корегувати їх в значення в бібліотеці САПР та вносити безпосередньо в бібліотеку системи параметри при відсутності даних про компонент, який збираємося використати при проектуванні.

Структурна схема приладу, розробленого та описаного авторами в [2], показана на рис.1. Керує роботою приладу персональний комп'ютер (PC).

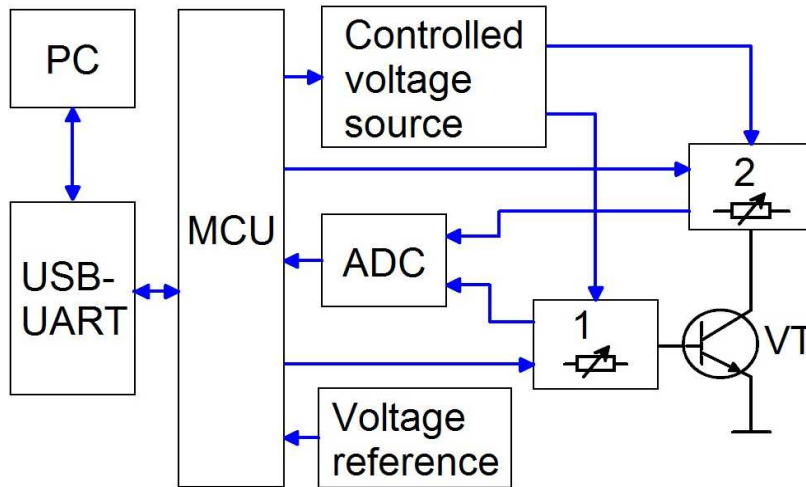


Рисунок 1. Структурна схема приладу для вимірювання параметрів напівпровідникових компонент

Команди з нього через універсальний асинхронний приймач-передавач (USB-UART) передаються на мікроконтролер (MCU), який керує модулем формування тестових напруг (Controlled voltage source). Модуль формує тестові напруги для кожної робочої точки транзистора. Полярність тестової напруги перемикається в залежності від типу досліджуваного компоненту. Блоки перестройки опорів 1 та 2 забезпечують необхідну точність вимірювання для різних значень струмів через електрод та для різних типів вольт-амперних характеристик що вимірюються. Значення вимірних величин за допомогою ADC перетворюються в код, який в реальному часі надходить до мікроконтролера і далі до комп'ютера і зберігається в пам'яті. Після закінчення вимірювання на екрані PC відображаються вхідна та вихідна ВАХ досліджуваного приладу, на основі яких розраховуються параметри моделі. Параметри NF , RE , IS , BF , IKF можуть бути отримані рішенням систем рівнянь, що пов'язують експериментальні значення струмів бази і колектора I_B , I_C та напруги база-емітер V_{BE} . Параметр VAF знаходиться з залежності I_C від

напруги колектор-емітер V_{CE} .

На рис.2 наведено вихідну ВАХ транзистора КТ315Б. Вимірювання тривало близько 20 секунд. Кожна крива сімейства побудована на основі 20 точок [2].

Порівняння експериментально вимірних параметрів транзистора з його параметрами в моделі

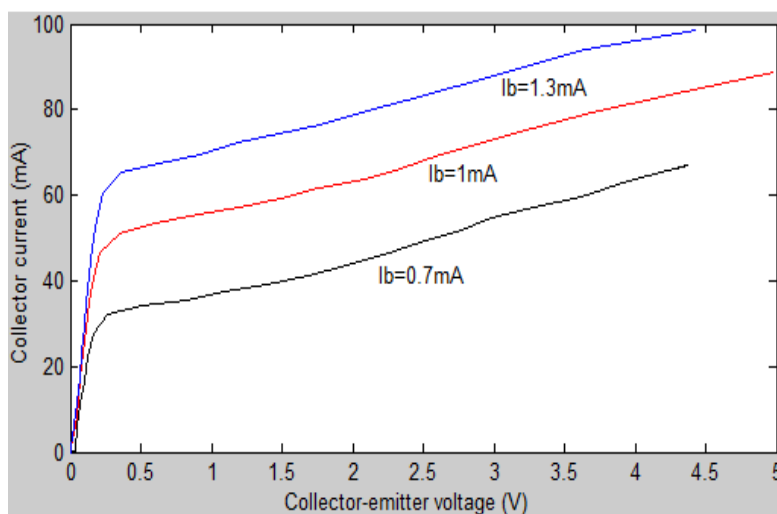


Рисунок 2. Сімейство вихідних характеристик транзистора КТ315Б знятих розробленим приладом.

САПР покажемо на прикладі транзистора BD139, оскільки його можна

знайти в багатьох сучасних САПР. В таблиці наведені теоретичні (із бази даних бібліотеки) та експериментально виміряні і автоматично розраховані параметри моделі транзистора BD139.

Таблиця

Параметри транзистора BD139 з бази даних та експериментально виміряних

| Параметр | NF | RE [Ом] | IS [A] | BF | IKF [A] | VAF [B] |
|----------|-------|---------|------------------------|-------|---------|---------|
| Бази. | 1,002 | 0,366 | $10 \cdot 10^{-15}$ | 200 | 0,560 | 100 |
| Експ. | 0,788 | 0,174 | $10,45 \cdot 10^{-15}$ | 157,3 | 0,361 | 103 |

Як бачимо значення параметрів транзистора, які задані в бібліотеці САПР, суттєво відрізняються від тих, що експериментально виміряні для конкретного компоненту, що буде використовуватися в схемі. Корегування параметрів моделі дозволить підвищити достовірність результату симуляції. Це в свою чергу буде гарантією того, що РЕА побудована на основі схеми розрахованої в САПР, буде працювати з заданими характеристиками без додаткового налаштування.

Перелік посилань

1. Амелина М.А Программа схемотехнического моделирования MicroCap 8.0 / Амелина М.А., Амелин С.А. М.: — М.: Горячая линия — Телеком, 2007. — 345 с.
2. Грицевич І.Р. Прилад для дослідження напівпровідникових елементів /І.Р.Грицевич, В.О.Піддубний// Міжн. наук.-техн. конф. РТПСАС 2016 «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». — Київ, 2016. —С. 63 — 65.

Анотація

Представлено прилад для автоматизованого дослідження електричних характеристик напівпровідників, що дозволяє корегувати параметри математичної моделі біполярних транзисторів в САПР. Описано алгоритм роботи приладу. Обґрунтовано доцільність корекції параметрів в бібліотеці САПР для проектування РЕА без наступного її налаштування.

Ключові слова: параметри моделей, характеристики транзистора, САПР.

Аннотация

Представлен прибор для автоматизированного исследования электрических характеристик полупроводников, который позволяет корректировать параметры математической модели биполярных транзисторов в САПР. Описан алгоритм работы прибора. Обоснованно целесообразность коррекции параметров в библиотеке САПР для проектирования РЕА без последующей ее настройки.

Ключевые слова: параметры моделей, характеристики транзистора, САПР.

Abstract

Presented is the contingency for the automated dosage of electric characteristics, which allows to adjust the parameters of the mathematical model of bipolar transistors in CAD. The robotics algorithm is described. The rationale for the correction of parameters in the CAD library for the design of CEA without further adjustment is justified.

Key words: parameter models, transistor characteristics, CAD.