

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Аппаратно-программный комплекс для измерения статических вольт-
амперных характеристик биполярных транзисторов**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4071 группы

направления 11.03.03 «Конструирование и технология электронных средств»
код и наименование направления

института физики
наименование факультета

Колосова Вячеслава Тихоновича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
Доцент, д.ф.-м.н.
должность, уч. степень, уч. Звание

02.06.26
дата, подпись

Д.А. Колосов
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой радиотехники и
электродинамики
д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

02.06.26
дата, подпись

О.Е. Глухова
инициалы, фамилия

Саратов 2026 г.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Биполярные транзисторы (БТ) остаются фундаментальной элементной базой современной электроники, особенно в силовых преобразователях, аналоговых схемах и высокочастотных устройствах. Ключевым условием надежного функционирования радиоэлектронной аппаратуры является гарантированное соответствие параметров компонентов их спецификациям. Входной контроль и диагностика БТ традиционно включают измерение коэффициента усиления по току (h_{21}), напряжений насыщения и пробоя, а также обратных токов переходов.

Однако, как было отмечено в фундаментальных работах и подтверждено современными инженерными методиками, уже на этапе простейшей диодной позвонки проявляется тонкая физическая асимметрия между переходами база-эмиттер и база-коллектор. Разница в прямом падении напряжения на этих переходах, обусловленная различием в площади и уровне легирования, несет в себе важную диагностическую информацию о качестве и структурной целостности прибора. Традиционные мультиметры позволяют лишь субъективно «заметить» эту разницу, но не измерить ее количественно с привязкой к току и температуре, что делает невозможным её систематическое использование для отбраковки или научного анализа.

Существующие лабораторные характериографы (Keysight B1505A, Tektronix 370B) являются прецизионными, но чрезвычайно дорогими и стационарными приборами. В условиях массового производства, ремонтных мастерских и учебных лабораторий ощущается потребность в программируемых измерительных системах. Платформа ESP32, обладающая несколькими встроенными цифро-аналоговыми преобразователями, создает технологическую основу для разработки измерительного комплекса, способного не просто констатировать факт проводимости, но и строить вольтамперные характеристики (ВАХ) и вычислять тонкие структурные параметры транзистора.

Степень разработанности проблемы. Теоретические основы физики p-n переходов и биполярного транзистора, дальше в тексте как БТ, глубоко проработаны в трудах Эберса-Молла и позднее систематизированы в учебниках Пауля, Степаненко. Экспериментальной верификации связи структуры БТ с его характеристиками посвящены работы в IEEE Transactions on Education.

Объект исследования: БТ малой и средней мощности в корпусах общего применения (n-p-n и p-n-p структур).

Предмет исследования: Методы и алгоритмы автоматизированного измерения статических характеристик биполярных транзисторов с использованием микроконтроллеров.

Целью дипломной работы является разработка и создание действующего прототипа характериографа на аппаратной платформе ESP32, способного выполнять автоматическую идентификацию выводов БТ, построение семейств выходных ВАХ. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ физических механизмов, обуславливающих разницу вольтамперных характеристик эмиттерного и коллекторного переходов, и обосновать диагностическую ценность измерения этой разницы.
2. Выполнить обзор и сравнительный анализ схемотехнических решений для построения управляемых источников тока и измерительных каскадов.
3. Разработать принципиальную электрическую схему измерительного модуля, сопрягаемого с ESP32, обеспечивающую формирование тестовых токовых импульсов и измерение падения напряжения между выводами.
4. Разработать программное обеспечение для микроконтроллера ESP32, реализующее алгоритмы автоматического «прозвона» и определения цоколёвки неизвестного транзистора по критерию $V_{BE} > V_{BC}$, построения ВАХ.
5. Провести экспериментальную верификацию прототипа на выборке транзисторов различных производителей и оценку погрешности измерений

1. ТЕОРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Биполярный транзистор представляет собой полупроводниковую структуру с тремя областями — эмиттером, базой и коллектором — и двумя р-п переходами. Эмиттер легирован максимально сильно для инжекции носителей заряда, база выполняется предельно тонкой и слаболегированной для управления сквозным потоком, а коллектор имеет наибольшую площадь для сбора носителей и отвода тепла. Транзисторы бывают n-p-n и p-n-p типов, причём n-p-n структуры получили большее распространение из-за более высокой подвижности электронов.

Транзистор может работать в четырёх режимах: активном, инверсном, насыщения и отсечки. Активный режим, где эмиттерный переход открыт, а коллекторный закрыт, является основным и используется для усиления сигналов. В этом режиме электроны инжектируются из эмиттера в базу, диффундируют через тонкую базу к коллекторному переходу и экстрагируются его электрическим полем. Сквозной поток носителей создаёт коллекторный ток, который управляется напряжением на эмиттерном переходе и почти не зависит от напряжения на коллекторе. Именно эта способность управлять выходным током через входное напряжение составляет суть усилительного действия транзистора.

К числу основных параметров транзистора относятся коэффициент усиления по току β , входное сопротивление, выходная проводимость и частотные характеристики. С повышением частоты усилительные свойства ухудшаются из-за паразитных ёмкостей переходов. На входных и выходных вольтамперных характеристиках показаны зависимости тока базы от напряжения база-эмиттер и тока коллектора от напряжения коллектор-эмиттер при разных токах базы.

Ключевой вывод теоретической части касается физической асимметрии падений напряжения на переходах база-эмиттер и база-коллектор. При одинаковом измерительном токе прямое падение напряжения на эмиттерном переходе всегда оказывается выше, чем на коллекторном. Это обусловлено тремя

факторами: меньшей площадью эмиттерного перехода по сравнению с коллекторным, что создаёт более высокую плотность тока; значительно более сильным легированием эмиттера, приводящим к большей контактной разности потенциалов; и технологическими особенностями эпитаксиально-планарных структур, изменяющими профиль распределения примесей в коллекторной области. Для кремниевых маломощных транзисторов разница $V_{BE} - V_{BC}$ стабильно составляет 2–10 мВ. Этот параметр служит надёжным диагностическим признаком, позволяющим однозначно идентифицировать эмиттер и коллектор неизвестного транзистора без справочных данных, что и положено в основу разработанного алгоритма автоматического определения цоколёвки.

2. СХЕМАТЕСНИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Общая архитектура

Разработана модульная структура, рисунок 1:

- Центральный микроконтроллер ESP32 (двухъядерный, 240 МГц, ЦАП, I2C);
- Источник напряжения коллектор–эмиттер (0–20 В, до 500 мА);
- Два регулируемых источника тока (для NPN и PNP);
- Измерительный тракт с коммутацией выводов;

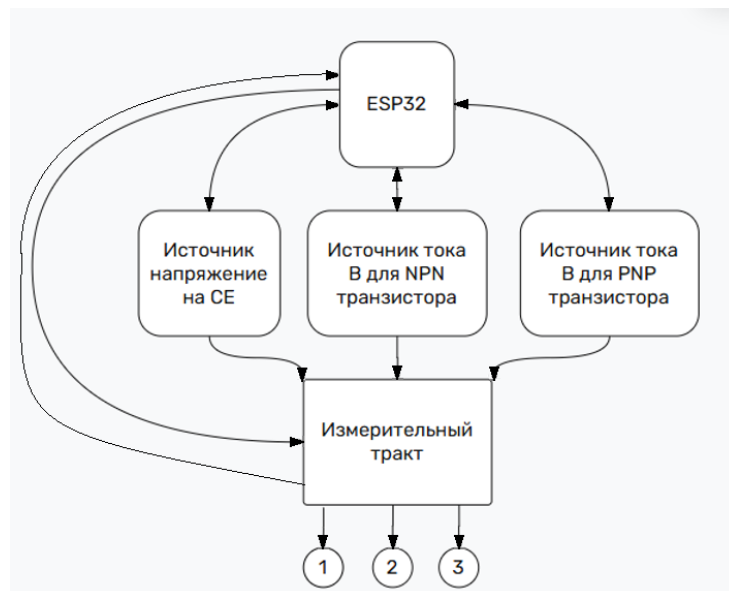


Рисунок 1 – Общая архитектура характериографа

Узел источника VCE, отображённый на рисунке 2

Позволяет изменять напряжение на коллектор – эмиттере от 0 до 20 вольт, при помощи ЦАП, выдающий напряжение от 0 до 3.3 вольт. Построен на LM358 (неинвертирующий усилитель с $K_u \approx 6$) и составном транзисторе КТ972А (эмиттерный повторитель).

Управление — ЦАП ESP32 (D25).

Измерение тока — по шунту R1 через ADS1115.

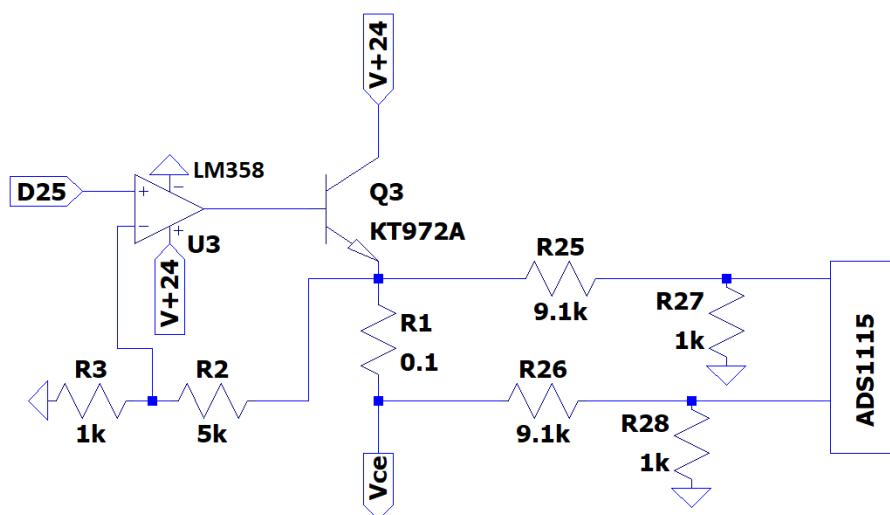


Рисунок 2 – Схема источник регулируемого напряжения коллектор – эмиттер

Узлы источников тока базы, отображённые на рисунках 3 и 4. Для NPN: преобразователь напряжение–ток на LM358, AD5245 (задание диапазона), ток до 10 мА. Позволяет изменять ток на базе NPN транзистора при помощи ЦАП, выдающий напряжение от 0 до 3.3 вольт.

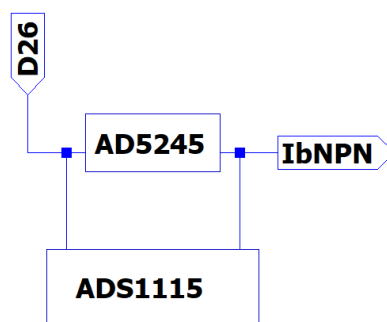


Рисунок 3 – Схема источник регулируемого тока базы NPN транзистора

Для PNP: аналогично, с инвертированием направления тока. Позволяет изменять ток на базе PNP транзистора при помощи ЦАП, выдающий напряжение от 0 до 3.3 вольт.

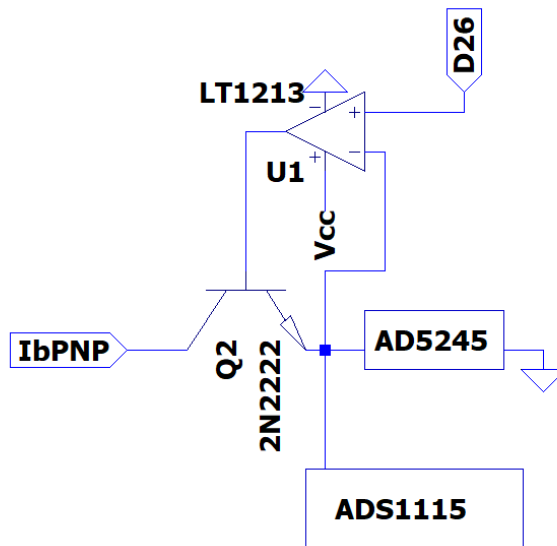


Рисунок 4 – Схема источник регулируемого тока базы PNP транзистора

Измерительный тракт и коммутация, отображённый на рисунке 5. Три универсальные линии (выводы 1,2,3) подключаются к:

- Vce;
- Ib (NPN);
- Ib (PNP);
- GND.

Коммутация — на транзисторных ключах под управлением сдвигового регистра SN74HC595N. Измерение напряжений на выводах — через ADS1115.

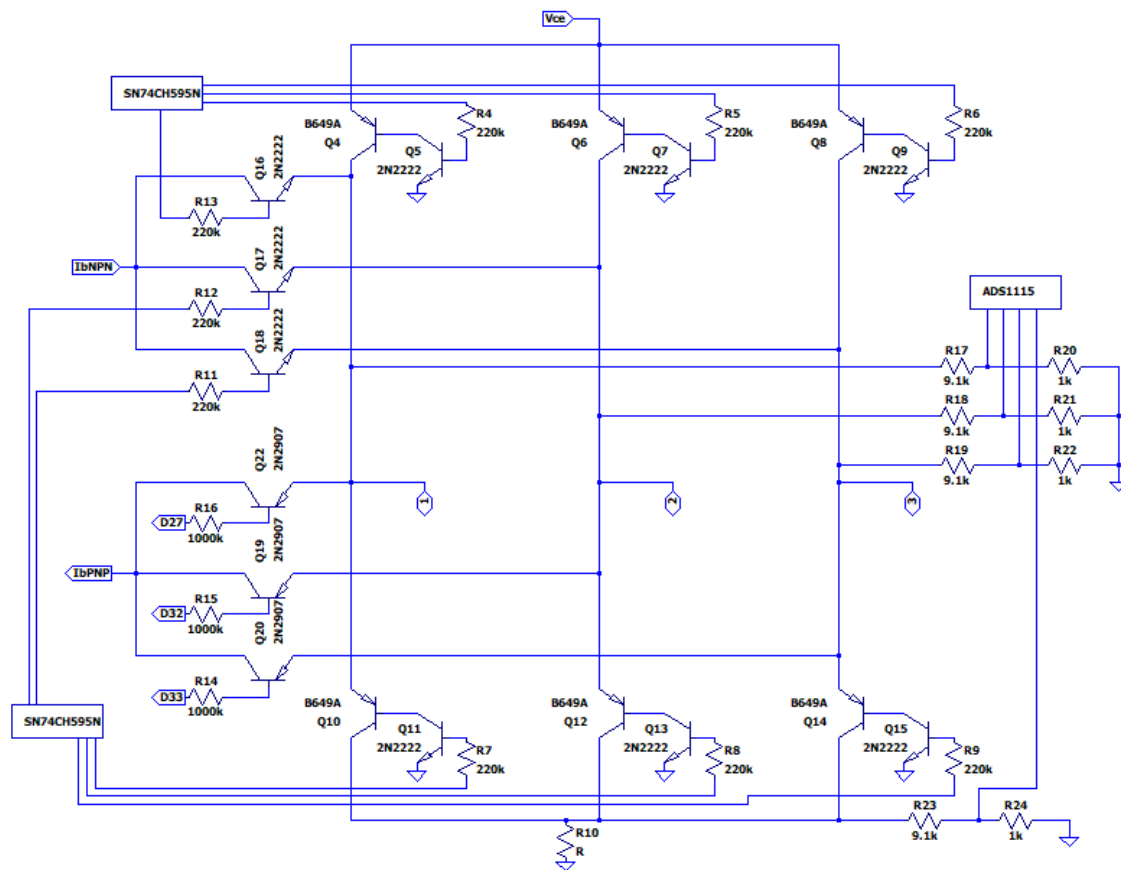


Рисунок 5 – Схема измерительного тракта

Печатная плата и прототип. Спроектирована печатная плата, изготовлен и отлажен рабочий прототип устройства, рисунке 6 и 7.

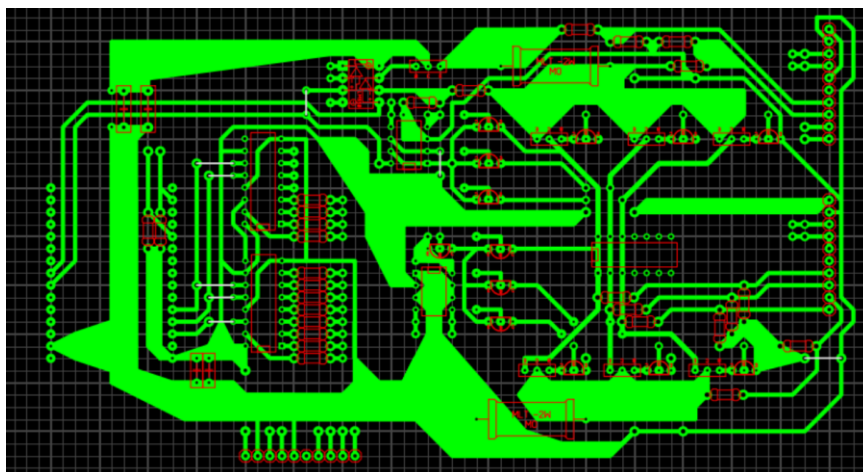


Рисунок 6 – Спроектированная плата характерографа

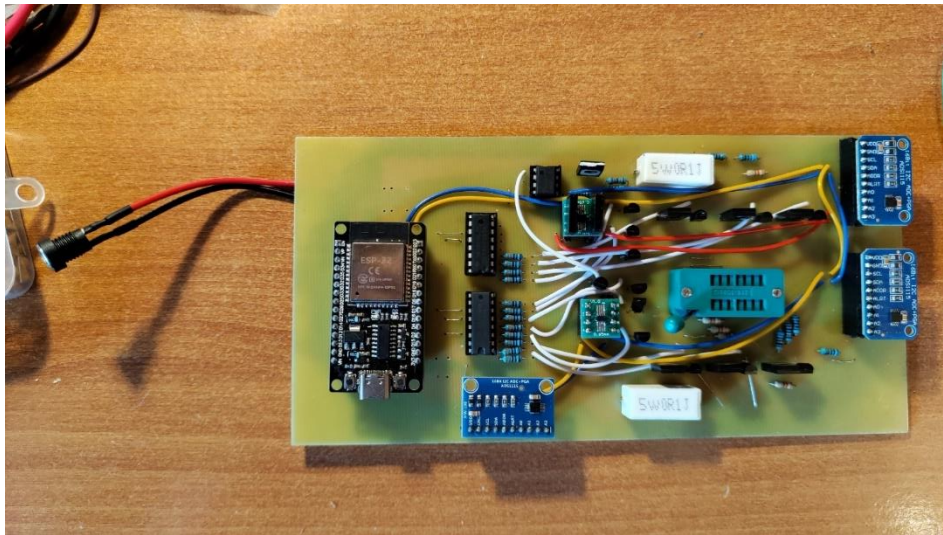


Рисунок 7 – Устройство в сборе

Программная реализация

Прошивка для ESP32 (Arduino IDE). Реализованы следующие алгоритмы:

1. Режим «прозвон» - позволяет автоматически определять цоколёвки транзистора
2. Режим снятия входных ВАХ
3. Режим снятия выходных ВАХ

ПО для ПК (Python), рисунок 8. Разработано приложение, которое:

- Устанавливает связь с ESP32 по UART;
- Запускает измерительные циклы;
- Принимает данные;
- Строит графики входных и выходных ВАХ;
- Сохраняет результаты в файл.

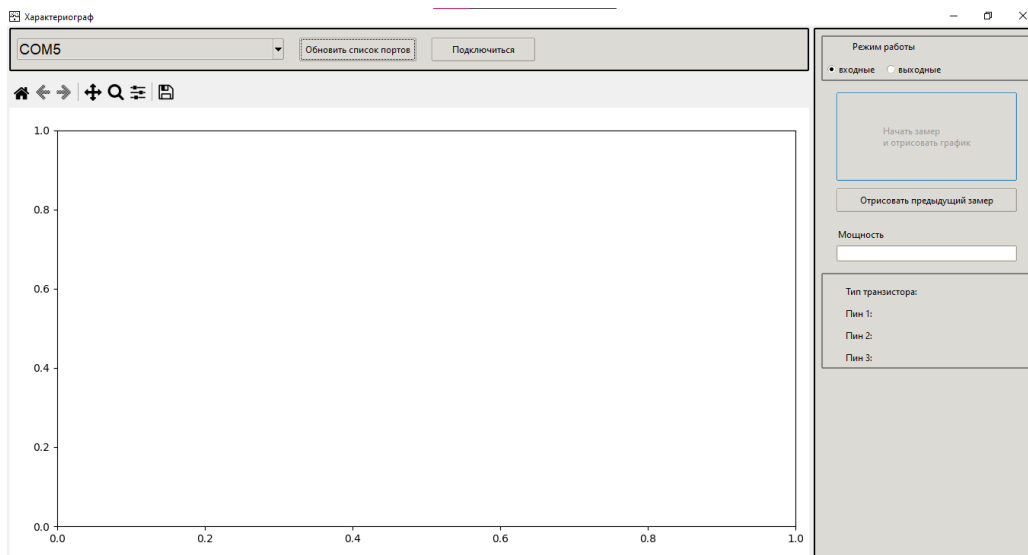


Рисунок 8 – Программное обеспечение

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Были протестированы транзисторы разных производителей. Примеры измеренных характеристик транзистора NPN, рисунок 9 и 10.

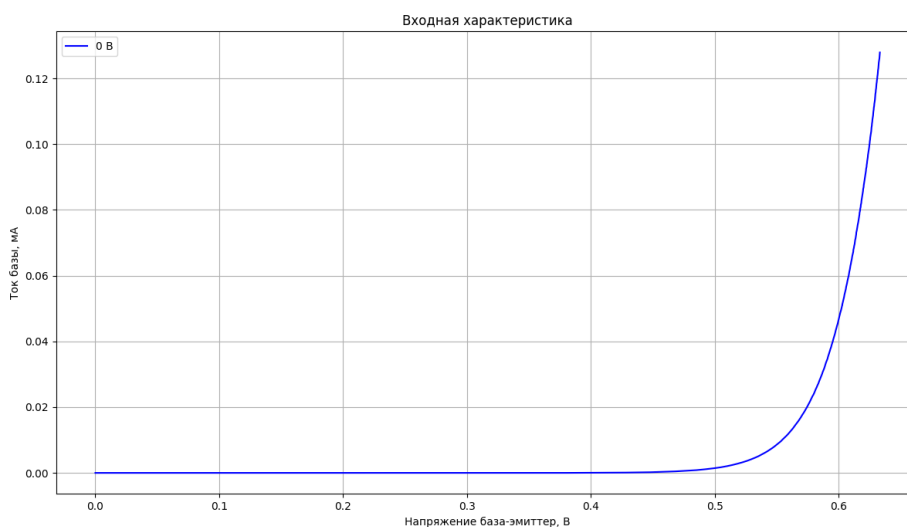


Рисунок 9 – Входная характеристика транзистора 2N2222

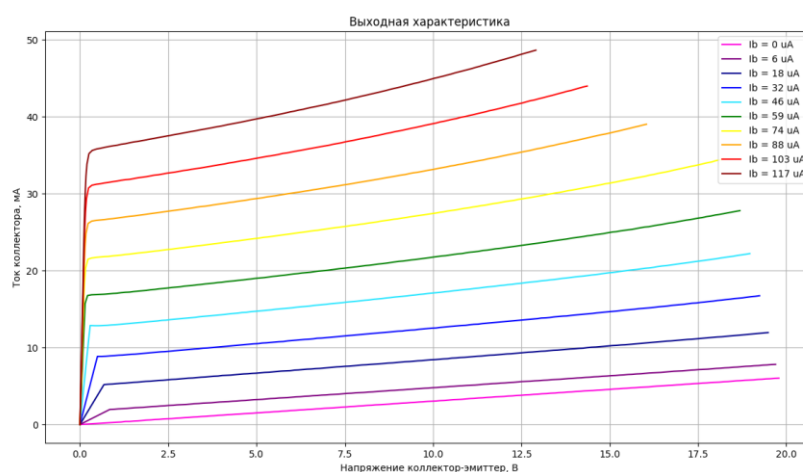


Рисунок 10 – Выходная характеристика транзистора 2N2222

Оценка погрешности. Выполнено сравнение с ручным измерением:

- Расхождение по V_{BE} — не более ± 1 мА при малом напряжении коллектор - эмиттер;
- Расхождение по I_C в активной области — до 5% (из-за саморазогрева при ручном замере);
- Автоматический замер быстрее → нагрев меньше → результат точнее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения данной бакалаврской работы была достигнута поставленная цель: разработан и создан действующий прототип характерографа для биполярных транзисторов на платформе ESP32. Устройство способно автоматически определять цоколёвку, идентифицировать тип проводимости (n-p-n или p-n-p) и строить семейства статических вольтамперных характеристик (ВАХ). По итогам работы можно сделать следующие выводы.

1. По теоретической части Был проведён детальный анализ физики работы биполярного транзистора, в ходе которого подтверждено, что асимметрия падений напряжения на переходах база-эмиттер и база-коллектор ($V_{BE} > V_{BC}$) имеет не случайный, а фундаментальный характер. Она обусловлена разницей в площадях переходов, уровне легирования и технологическими особенностями (эпитаксиальная структура). Теоретически обоснована диагностическая ценность этого параметра – его можно использовать для однозначной идентификации эмиттера и коллектора без справочных данных, что и было реализовано на практике.
2. По схемотехнической части Выполнен обоснованный выбор компонентной базы:
 - 16-битный АЦП ADS1115 обеспечил необходимое разрешение (до 0,1 мВ при измерении дельты $V_{BE} - V_{BC}$);
 - цифровые потенциометры AD5245 и ОУ LM358 позволили программное управлять токами базы и напряжением коллектор-эмиттер;
 - сдвиговый регистр SN74HC595N решил проблему нехватки выводов ESP32.
 - Разработана принципиальная схема, включающая три ключевых узла: управляемый источник напряжения V_{CE} (0–20 В), два программируемых источника тока для NPN и PNP структур, а также измерительный тракт с коммутацией выводов. Спроектирована и изготовлена печатная плата, собран рабочий прототип.

3. По программной реализации написана прошивка для ESP32 (среда Arduino IDE), реализующая:

- алгоритм «прозвона»: подача коротких импульсов тока на все возможные пары выводов, измерение V_{BE} и V_{BC} , автоматическое определение цоколёвки по критерию $\Delta V = V_{BE} - V_{BC}$;
- режим построения семейства выходных ВАХ: пошаговое изменение тока базы и измерение тока коллектора при варьировании V_{CE} . Дополнительно разработано ПО на Python для ПК, которое через UART управляет измерением, получает данные и строит графики (примеры для транзистора 2N2222 приведены в экспериментальной части).

4. По экспериментальной верификации

Прототип протестирован на выборке транзисторов разных производителей (включая 2N2222, BC548, 2N2907). Результаты показали:

- разница $V_{BE} - V_{BC}$ стабильно составляет 2–10 мВ для заведомо исправных приборов, что позволило реализовать надёжную автоматическую идентификацию выводов (ошибок за время тестов не зафиксировано);
- полученные результаты достаточно точны, и засчёт быстрого замера характеристик транзистор не успевает сильно разогреться;

5. Недостатки и направления дальнейшего развития

В ходе работы выявлены ограничения текущей версии:

- диапазон токов базы ограничен (до ≈ 10 мА из-за применяемого AD5245);
- Не подходящая схема источник тока для PNP Приводящая к смещению графиков выходной характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зи, С. М. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. / С. М. Зи. - Москва : Мир, 1984. - 456 с. - Текст: непосредственный.
2. Эберс, Дж. Дж. Крупномасштабные транзисторные характеристики / Дж. Дж. Эберс, Дж. Л. Молл. - Текст : непосредственный // Зарубежная радиоэлектроника. - 1955. - № 4. - С. 13–25.
3. Пауль, Р. Анализ транзисторных схем: учебное пособие для вузов / Р. Пауль. - Москва : Мир, 2019. - 340 с. - ISBN 978-5-91918-452-6. - Текст : непосредственный.
4. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: учебное пособие для вузов / И. П. Степаненко. - 3-е изд., перераб. и доп. - Санкт-Петербург : Лань, 2017. - 488 с. - ISBN 978-5-8114-0966-2.
5. Экспериментальная верификация структуры биполярного транзистора в учебном процессе / В. Е. Чернов, А. С. Калашников, Д. А. Крюков, П. А. Смирнов. // IEEE Transactions on Education. - 2020. - Т. 63, № 2. - С. 101-107. - DOI: 10.1109/TE.2019.2938145.
6. Аналоговая схемотехника: управляемые источники тока для измерительных систем / под редакцией С. В. Морозова. - Москва : ДМК Пресс, 2021. - 302 с. - ISBN 978-5-97060-789-5.
7. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника : справочное руководство : пер. с нем. / У. Титце, К. Шенк. — 12-е изд. — М. : ДМК Пресс, 2020. — 1784 с.
8. Шалимова К. В. Физика полупроводников : учеб. для вузов / К. В. Шалимова. — 5-е изд., стер. — М. : ЛИБРОКОМ, 2019. — 408 с.
9. Миллер Д. Современная электроника : от теории к практике : пер. с англ. / Д. Миллер. — М. : Техносфера, 2020. — 448 с.
10. Espressif Systems. ESP32-PICO-MINI-02 & ESP32-PICO-MINI-02U Datasheet. Version 1.6. – 2023. – 38 p. URL: https://documentation.espressif.com/esp32-pico-mini-02_datasheet_en.html (дата обращения: 11.06.2026).

11. Espressif Systems. ESP32-MINI-1 & ESP32-MINI-1U Datasheet. Version 1.7. – 2024. – 28 p URL: https://documentation.espressif.com/esp32-mini-1_datasheet_en.html (дата обращения: 11.06.2026).
12. Espressif Systems. ESP-IDF Programming Guide: Memory Types. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.1-beta1/esp32/api-guides/memory-types.html> (дата обращения: 11.06.2026).
13. Espressif Systems. ESP32-S3-WROOM-2 Datasheet. Version 1.7. – 2024. – 32 p. URL: https://documentation.espressif.com/esp32-s3-wroom-2_datasheet_en.html (дата обращения: 11.06.2026).
14. Espressif Systems. ESP32-WROVER-B & ESP32-WROVER-IB Datasheet. Version 2.2. – 2022. – 34 p. URL: https://documentation.espressif.com/esp32-wrover-b_datasheet_en.html (дата обращения: 11.06.2026).
15. Espressif Systems. ESP32-WROVER-E & ESP32-WROVER-IE Datasheet. Version 2.3. – 2023. – 36 p. URL: https://documentation.espressif.com/esp32-wrover-e_esp32-wrover-ie_datasheet_en.html (дата обращения: 11.06.2026).
16. Espressif Systems. ESP-IDF User Guide: Current Consumption Measurement of Modules URL: <https://documentation.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.4.2/esp32c5/api-guides/current-consumption-measurement-modules.html> (дата обращения: 11.06.2026).
17. Espressif Systems. Introduction to Low Power Mode in Wi-Fi Scenarios URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v6.0/esp32c5/api-guides/low-power-mode/low-power-mode-wifi.html> (дата обращения: 11.06.2026).
18. Inamdar A. ESP32-S2 — Security Features [Электронный ресурс] / A. Inamdar // Espressif Developer Blog. – 2019. URL: <https://developer.espressif.com/blog/esp32-s2-security-features/> (дата обращения: 11.06.2026).
19. Espressif Systems. ESP-IDF Security Guides URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.3.1/esp32s3/esp-idf-en-v5.3.1-esp32s3.pdf> (дата обращения: 11.06.2026).
20. Texas Instruments. ADS111x Ultra-Small, Low-Power, I²C-Compatible, 860SPS, 16-Bit ADCs with Internal Reference, Oscillator, and Programmable Comparator. –

SBAS444E. – 2009 (Revised December 2024). – 48 p.
URL: <https://static.chipdip.ru/lib/801/DOC059801500.pdf> (дата обращения: 28.05.2026).

21. Analog Devices. AD5245: 256-Position I²C Compatible Digital Potentiometer. – Rev. B. – 2003. – 16 p. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/006/DOC004006769.pdf> (дата обращения: 28.05.2026).

22. Texas Instruments. SNx4HC595 8-Bit Shift Registers With 3-State Output Registers. – SCLS041J. – December 1982 (Revised October 2021). – 36 p. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/442/DOC012442055.pdf> (дата обращения: 28.05.2026).

23. Texas Instruments. SN74HC595N Product Details. URL: <https://payalnik-on.ru/f/sn74hc595n.pdf?ysclid=mq959b3xuk514439149> (дата обращения: 28.05.2026).

24. Texas Instruments. LM358B, LM358BA, LM2904B, LM2904BA Dual Operational Amplifiers. – SLOS068. – June 1976 (Revised October 2024). – 53 p. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/819/DOC012819016.pdf> (дата обращения: 28.05.2026).

25. Texas Instruments. LM358, LM358A, LM358B, LM358BA Datasheet (китайская версия). – ZHCSIT6AB. – June 1976 (Revised October 2024). – 40 p. URL: <https://www.ti.com/cn/lit/ds/symlink/lm358.pdf> (дата обращения: 28.05.2026).