

РОССИЙСКИЙ ФОРУМ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКА



ШКОЛА
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ
ТЕРРИТОРИЯ
«СИРИУС»



15–23
сентября 2025

МИЭМ



Агрегированные цифровые двойники электронных модулей

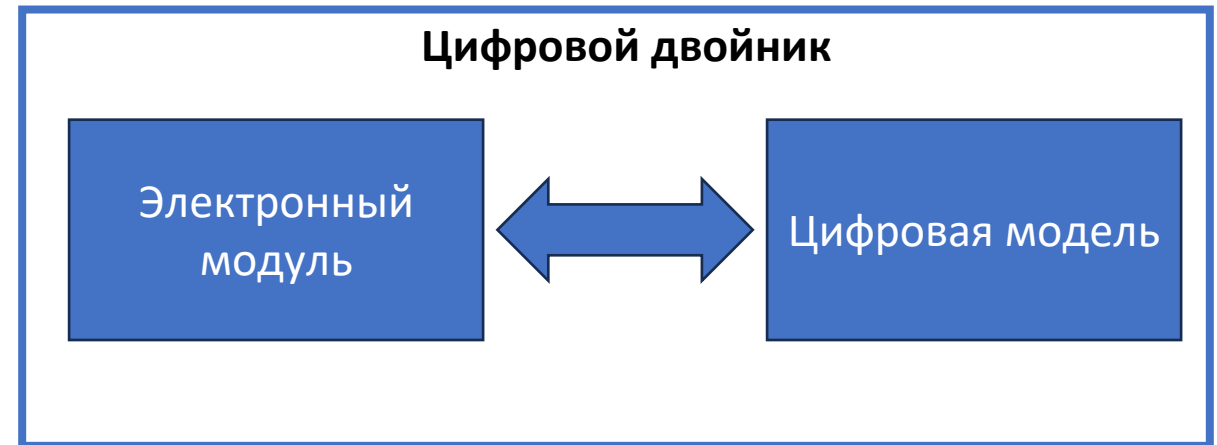
Чашкин Леонид Борисович

Аспирант 1 курса
МИЭМ НИУ ВШЭ

Ichashkin@hse.ru

+7 (915) 012-70-90

- ▶ Цифровой двойник электронного модуля — система, состоящая из цифровой модели и двусторонних информационных связей с электронным модулем или его составными частями



Компоненты цифрового двойника:

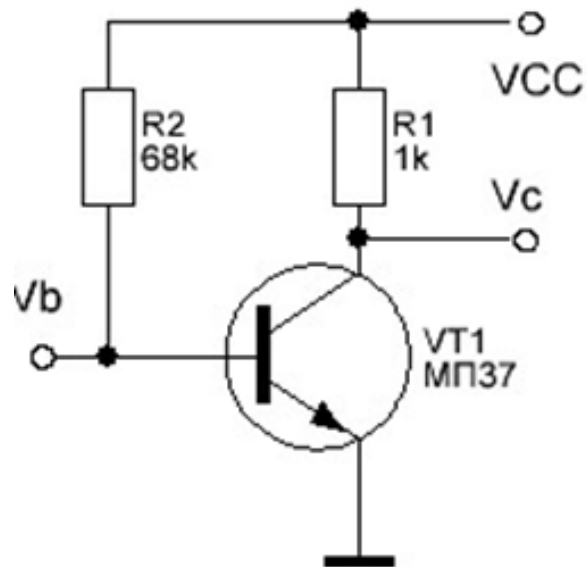
- Электронный модуль
- Цифровая модель
- Двусторонние информационные связи

- ▶ Проектирование схемы усилителя
- ▶ Моделирование усилителя
- ▶ Создание прототипа усилителя
- ▶ Разработка платформы
- ▶ Верификация модели усилителя
- ▶ Экспериментальные исследования цифрового двойника
- ▶ Оценка показателей надёжности (интенсивности отказов в режиме эксплуатации)

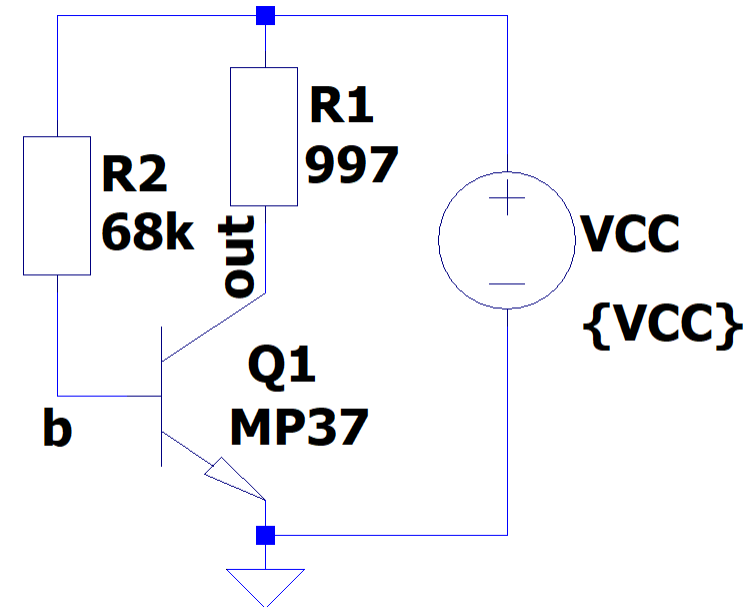
Этапы жизненного цикла продукта



Электрическая схема усилителя

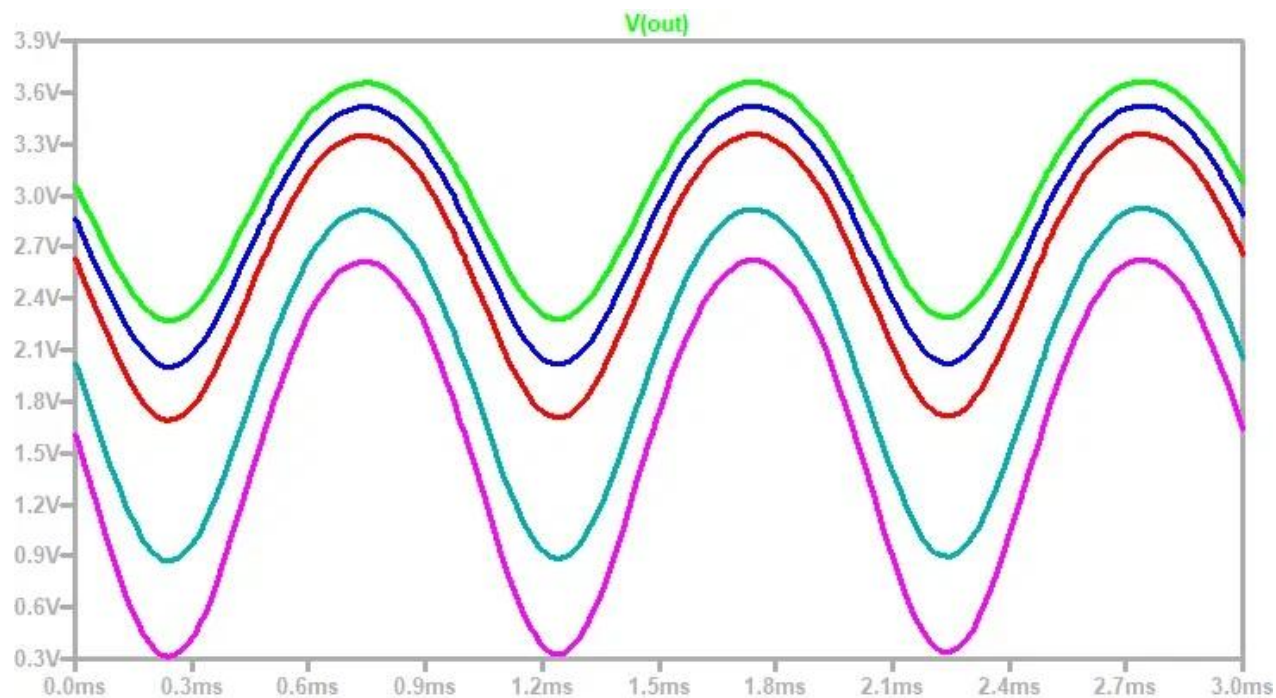


Электрическая модель усилителя



Компоненты схемы усилителя:

- Германиевый усилитель МП37
- 2 резистора сопротивлениями 68 кОм и 997 кОм соответственно

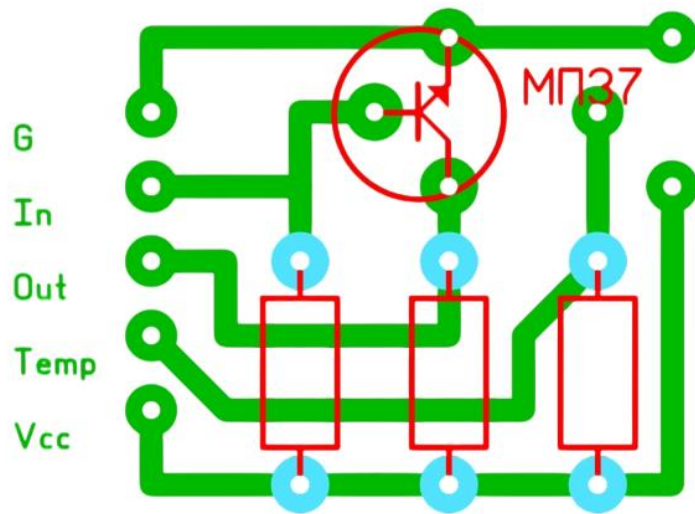


```

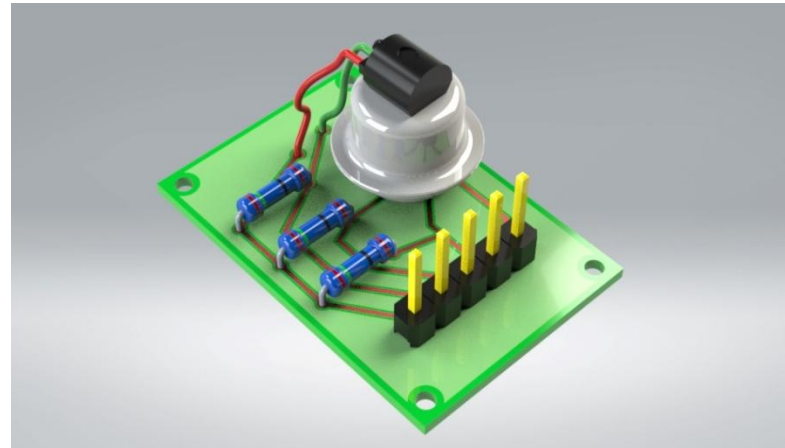
C:\Users\Student\Desktop\TWIN\digital_twins\spice_agent\model_... X
--- Operating Point ---
V(b) :          0.161769      voltage
V(n002) :        0          voltage
V(out) :        3.05789      voltage
V(n001) :        4.84208      voltage
Ic(Q1) :        0.00179315    device_current
Ib(Q1) :        6.89659e-05    device_current
Ie(Q1) :       -0.00186211    device_current
Is(Q1) :        0          device_current
I(R2) :         6.89659e-05    device_current
I(V1) :         1.61769e-18    device_current
I(C1) :         1.61769e-18    device_current
I(VCC) :       -0.00186211    device_current
I(R1) :         0.00179315    device_current
    
```

Моделирование усилителя осуществлялось в системе схемотехнического моделирования LTSpice при различных температурах

Топология печатной платы



3D-модель



Опытный образец



Контакты:

- Питание, земля
- Напряжение на коллекторе, напряжение на базе, датчик температуры

Архитектура платформы цифровых двойников

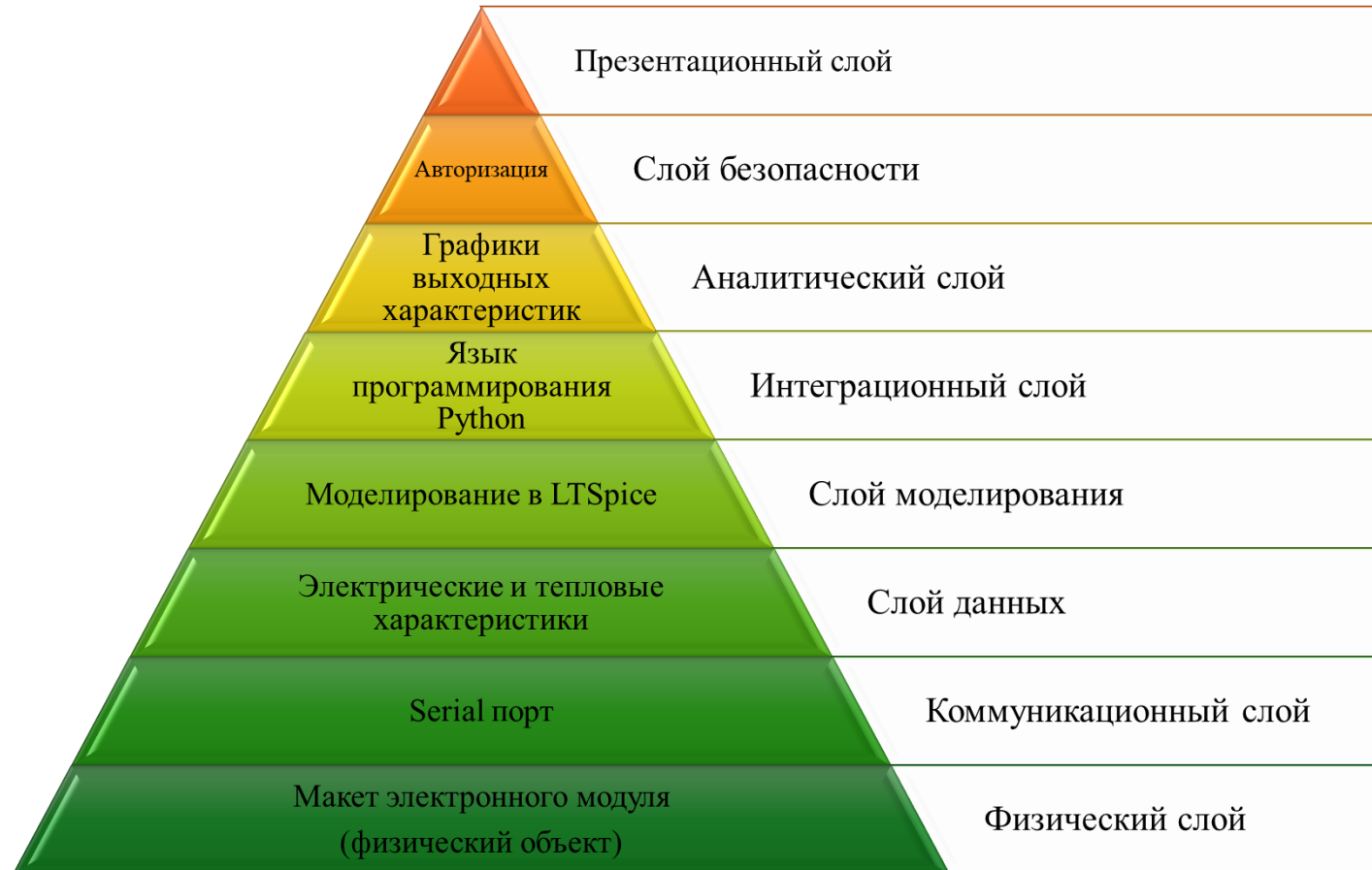
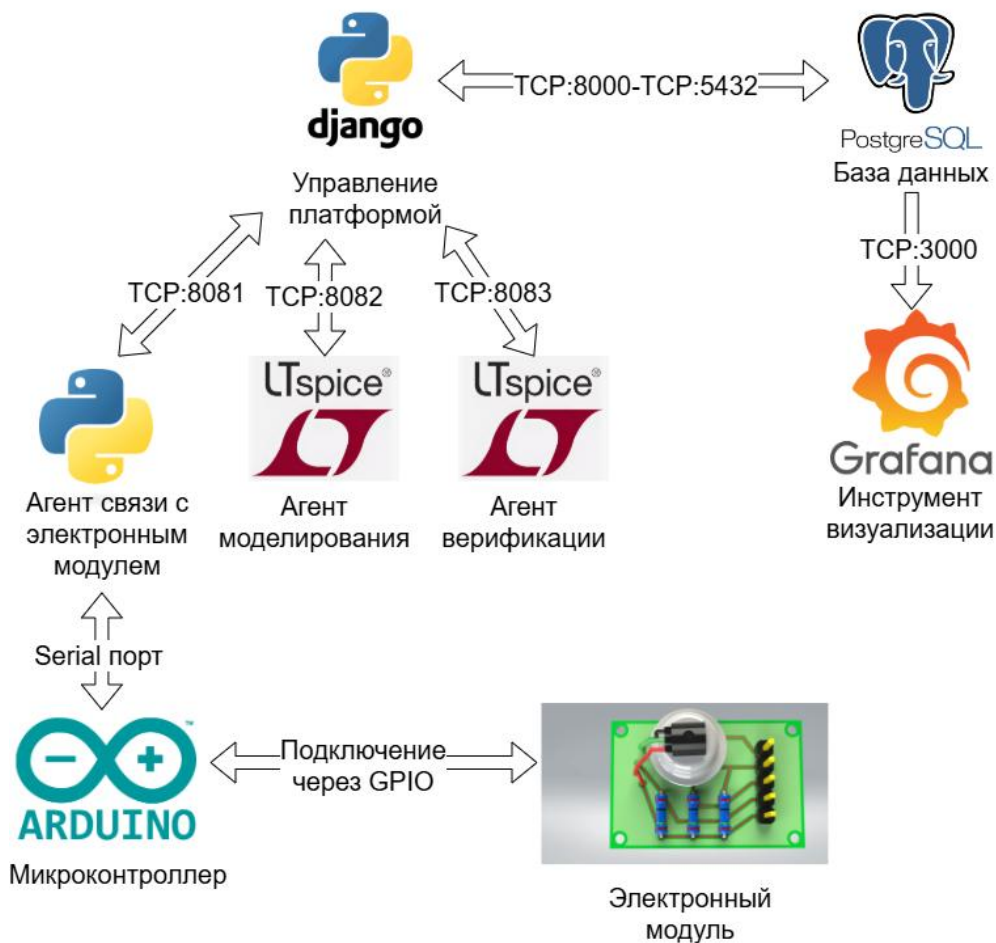


Схема взаимодействия



Компоненты платформы:


- База данных
- Сервис визуализации
- Сервис управления
- Микроконтроллер
- 3 программных агента
- Электронный модуль

Цифровые двойники электронных модулей


Главная Электронные модули Эксперименты Верификации Цифровой двойник

Платформа для создания цифровых двойников электронных модулей


Управление экспериментами, верификацией и синхронным моделированием




Электронные модули
Управление электронными модулями и их моделями



Эксперименты
Управление экспериментами



Верификации
Верификация моделей на основе экспериментов



Цифровой двойник
Синхронное моделирование

© 2025 Платформа для создания цифровых двойников электронных модулей
Чашкин Леонид Борисович

Эксперимент #15

[Изменить](#)
[← Назад](#)

Электронный модуль: [Модуль #4](#)

Время начала: 7 мая 2025 г. 13:30

Время окончания: 7 мая 2025 г. 13:30

Статус: **Завершён**

Описание: Нет описания

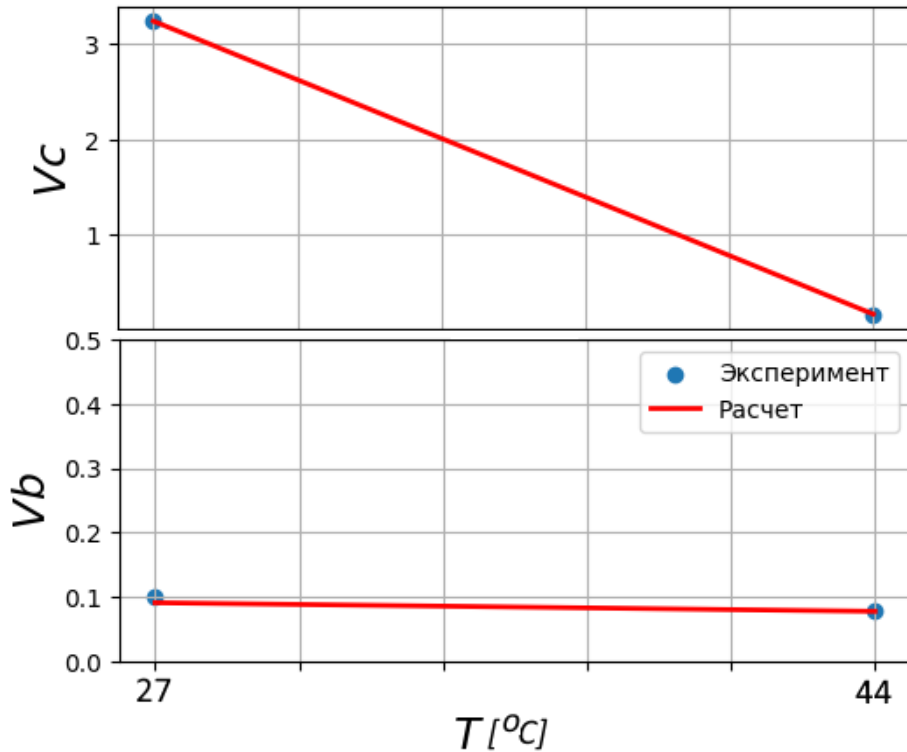
[Загрузить данные \(Excel\)](#)
[Результаты моделирования](#)

Верификации

ID	Статус	Результат	Действия
66	Завершена успешно	TC1=0.000675 .MODEL MP37 NPN (BF= 25 IS=3.73e-06 ...	Просмотр
64	Завершена успешно	TC1=0.000675 .MODEL MP37 NPN (BF= 25 IS=3.73e-06 ...	Просмотр
63	Завершена успешно	TC1=0.000675 .MODEL MP37 NPN (BF= 25 IS=3.73e-06 ...	Просмотр

Разделы:

- Электронные модули
- Эксперименты, верификации
- Цифровой двойник (синхронное моделирование)

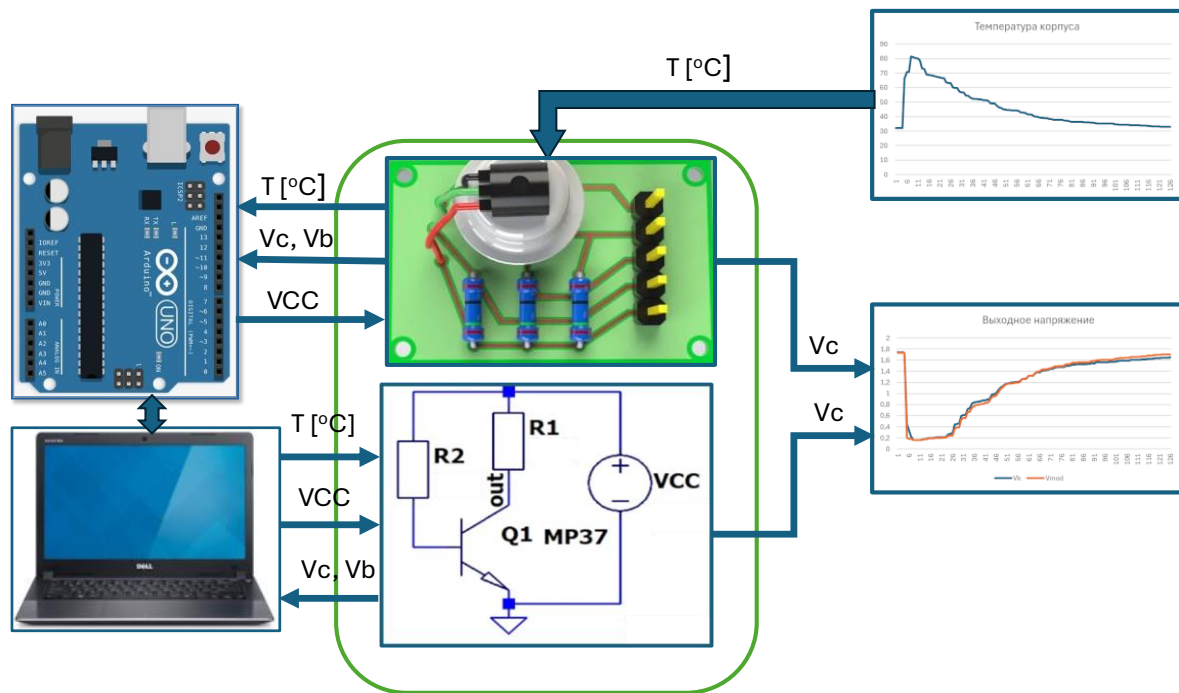


Целевая функция

$$E = \sum_{i=1}^2 \left((V_i^{cs} - V_i^c(q))^2 + (V_i^{bs} - V_i^b(q))^2 \right) \rightarrow \min$$

1. Коэффициент усиления тока базы МП37 BF = 12,
2. Ток насыщения IS = 7.33 мкА,
3. Температурный коэффициент коэффициента усиления тока базы МП37 ХТВ = 3.21,
4. Сопротивление базы МП37 RB = 0.785 Ом,
5. Ширина запрещённой зоны МП37 EG = 0.725 эВ,
6. Температурный коэффициент R1 и R2 TC1 = 3.35*10⁻⁴.

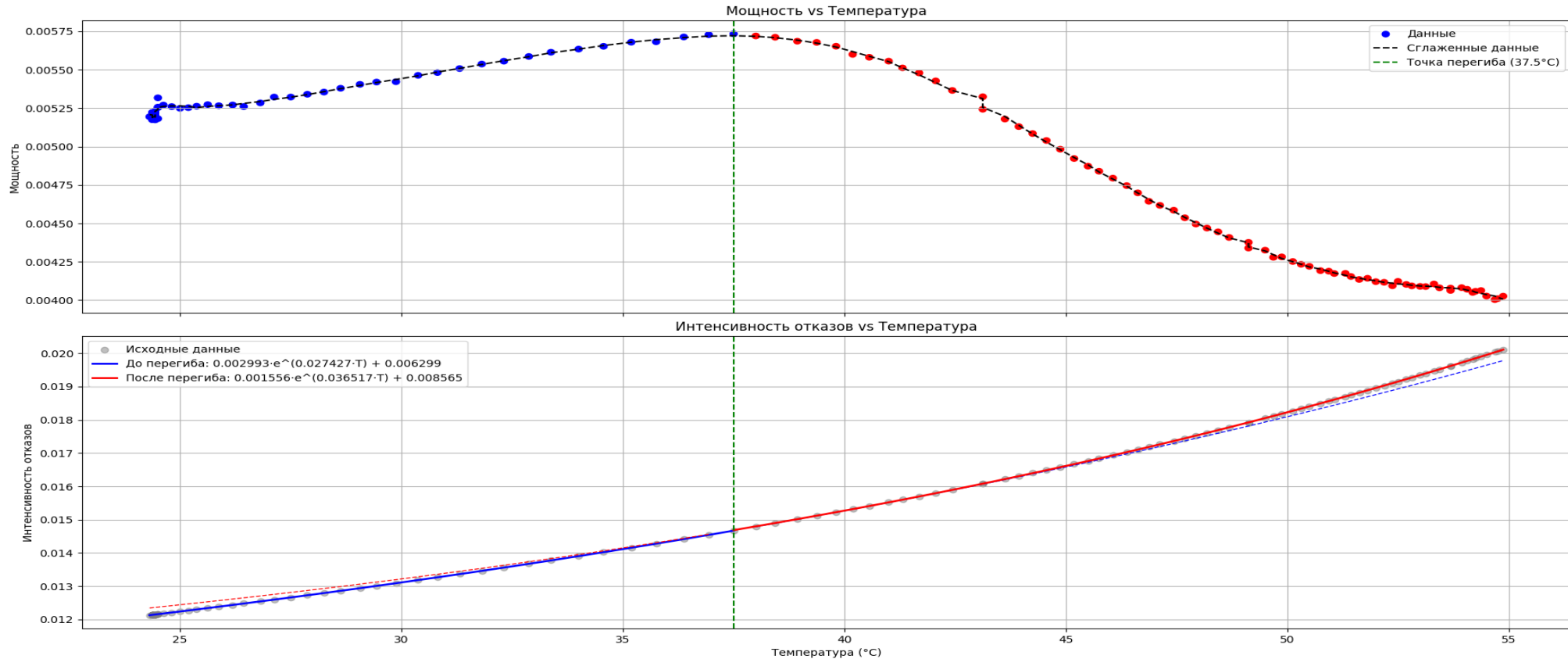
Верификация проводилась методом **условной оптимизации** COBYLA с использованием метода **замены параметров**



Для проведения экспериментов была создана термокамера для нагрева электронного модуля



Экспериментально полученная модель соответствует
опытному образцу. Погрешность не превышает 12%



Была выявлена точка перегиба, после которой влияние мощности на интенсивность отказов снижается

- ▶ Была разработана платформа для проведения экспериментов на основе цифровых двойников электронных модулей
- ▶ Был разработан прототип усилителя, создан его цифровой двойник
- ▶ Проведён эксперимент, подтвердивший корректность работы цифрового двойника усилителя
- ▶ Была проведена оценка надёжности на основе расчёта интенсивности отказов транзистора

Дальнейшие исследования:

- Построение полноценной модели надёжности на основе экспериментов с цифровым двойником
- Внедрение искусственного интеллекта для предсказания отказов

Спасибо за внимание!

- В научной работе использованы результаты проекта № **ФИ-2025-4**, выполненного в рамках Программы фундаментальных исследований **НИУ ВШЭ** в 2025 году



ОФИЦИАЛЬНЫЙ САЙТ
ШКОЛЫ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



MICROELECTRONICA.PRO



ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ И БУДЬТЕ В КУРСЕ
ВСЕХ ПОСЛЕДНИХ НОВОСТЕЙ!



ВАШ ЛИЧНЫЙ
КАБИНЕТ



Rutube