

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВСП «ОДЕСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ОНТУ»**

*Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»*

*Освітньо-професійна програма: «Обслуговування*

*комп'ютерних систем і мереж»*

*Група: 4КС-58*

# **Дипломний проект**

**здобувача освіти денної форми навчання  
КС.58.22.000.ДП**

***ЯНАКІ***

***ОЛЕКСАНДРА РОМАНОВИЧА***

**м. Одеса  
2025 р.**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВСП «ОДЕСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ОНТУ»

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма: «Обслуговування комп'ютерних систем і мереж»

Група: 4КС-58

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту на тему:

### Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері

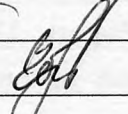
Проектний матеріал складається з пояснювальної записки на 82 сторінках та графічного (презентаційного) матеріалу на 16 аркушах (слайдах)

Дипломник  (Янакі О.Р.)

Керівник  (Шувалова І.О.)

#### Консультанти:

з економічного розділу  (Канський М.Ю.)

з розділу охорони праці та техніки безпеки  (Чорновол Н.І.)

з нормоконтролю  (Петрашова В.І.)

старший консультант  (Кривченко Ю.В.)


#### До захисту допущений

Голова циклової комісії  (Кривченко Ю.В.)

Завідувач відділення  (Краснокутська К.Г.)

Захист «21» червня 2025 р. Протокол ЕК № 2

Оцінка ЕК 4 (добре) / 80 балів

Секретар ЕК 

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ВСП «ОДЕСЬКИЙ ТЕХНІЧНИЙ ФАХОВИЙ КОЛЕДЖ ОНТУ»

Відділення комп'ютерних систем Комісія КТ та ПІ  
Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»  
Освітньо-професійна програма «Обслуговування комп'ютерних систем і мереж»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Заст. дир. з НВР 

Беркань І.В.

« 19 » 08 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект

Здобувачеві (здобувачці) освіти Янакі Олександр Романовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері

затверджена наказом по коледжу від « 14 » 11 2024 р. № 246

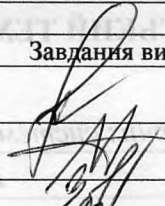
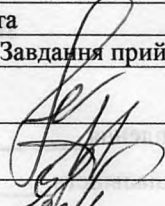
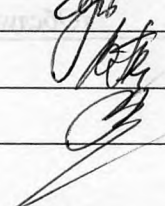
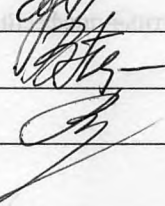
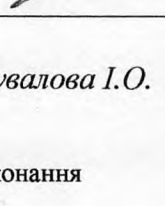

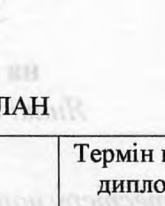
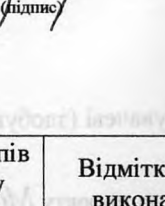
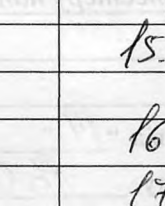
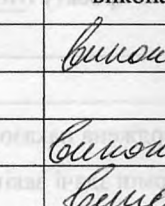
2. Термін здачі закінченого проекту 16.06.25

3. Вихідні данні до проекту (роботи) 1. Виконати модернізацію тестеру на базі проекту Markus Frejek AVR-Transistortester, Embedded Projects Journal, 11 Ausgabe, 2011; 2. Забезпечити захист портів мікроконтролера ATmega328; 3. Передбачити використання поворотного енкодера для керування режимами роботи тестеру з корекцією брязкоту контактів перемикачів; 4. Передбачити підключення кольорового дисплею; 5. Здійснити заходи по зменшенню струму споживання тестеру в режимі сну

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) Аналіз існуючих тестерів напівпровідникових транзисторів; Аналіз параметрів різних типів транзисторів; Аналіз принципів роботи тестера напівпровідникових транзисторів та структурної схеми; Модернізація принципової електричної схеми тестеру; Розробка блок-схем тестування транзисторів за допомогою модернізованого тестеру; Отримання результатів вимірювання параметрів транзисторів за допомогою модернізованого тестеру

5. Перелік графічного (презентаційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, кількості слайдів) Тестер транзисторів на базі проекту Markus Frejek AVR-Transistortester; Структурна схема тестеру транзисторів на AVR-мікроконтролері; Структура AVR-мікроконтролера ATmega328; Принципова електрична схема модернізованого тестеру транзисторів; Схема захисту портів ATmega; Схема підключення поворотного енкодера; Блок-схема алгоритму тестування транзисторів JFET і D-MOS; Блок-схема алгоритму тестування транзисторів BJT і E-MOS; Результати вимірювання параметрів транзисторів

6. Консультанти по проекту (роботі), із зазначенням розділів проекту, що їх стосується

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Основний розділ	Шувалова І.О.		
Економічний розділ	Канський М.Ю.		
Розділ охорони праці	Чорновол Н.І.		
Нормоконтроль	Петрашова В.І.		
Старший консультант	Кривченко Ю.В.		

7. Дата видачі завдання

15.05.25.

Керівник

Шувалова І.О.

Завдання прийняв до виконання

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/р	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Термін виконання етапів дипломного проекту (роботи)	Відмітка про виконання
1.	Вступ. Постановка задачі проектування	15.05.25.	виконано
2.	Аналіз існуючих тестерів напівпровідникових транзисторів	16.05.25.	виконано
3.	Аналіз параметрів різних типів транзисторів	17.05.25.	виконано
4.	Аналіз принципів роботи тестера напівпровідникових транзисторів	18.05.25.	виконано
5.	Опрацювання та адаптація структурної схеми тестера напівпровідникових транзисторів	19.05.25.	виконано
6.	Аналіз шляхів модернізації тестеру	20.05.25.	виконано
7.	Модернізація принципової електричної схеми тестеру	22.05.25.	виконано
8.	Розробка блок-схем тестування транзисторів за допомогою модернізованого тестеру	24.05.25.	виконано
9.	Отримання результатів вимірювання параметрів транзисторів за допомогою модернізованого тестеру	30.05.25.	виконано
10.	Економічні розрахунки і розробка питань охорони праці	1.06.25.	виконано
11.	Виконання графічної частини проекту	2.06.25.	виконано

Дипломник

(підпис)

Керівник

(підпис)

## РЕЦЕНЗІЯ

на дипломний проект здобувача (здобувачки) освіти  
відділення комп'ютерних систем

*Янакі Олександра Романовича*

(прізвище, ім'я та по батькові)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Освітньо-професійна програма «Обслуговування комп'ютерних систем і мереж»

Керівник дипломного проекту (роботи) Шувалова Ірина Олегівна

(прізвище, ім'я та по батькові)

Тема дипломного проекту (роботи) Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері

Обсяг розрахунково-пояснювальної записки 82 сторінок

Обсяг графічної (презентаційної) частини 16 аркушів (слайдів)

### ХАРАКТЕРИСТИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ (РОБОТИ)

а) заключення про ступінь відповідності виконаного дипломного проекту завданню

Представлений дипломний проект відповідає затвердженій темі та виконаний відповідно технічному завданню. Дипломний проект присвячений модернізації тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері і складається з пояснювальної записки та мультимедійної презентації з відповідними схемами.

б) характеристика виконання кожного розділу дипломного проекту

Пояснювальна записка складається з основного розділу (аналіз існуючих тестерів; Аналіз параметрів транзисторів; Аналіз принципів роботи тестера; Модернізація принципової електричної схеми тестеру; Розробка блок-схем тестування транзисторів; Отримання результатів вимірювання), економічного розділу, розділу охорони праці та додатків. Перелічені розділи поетапно охоплюють розробку, виконані докладно та обґрунтовано.

в) оцінка якості виконання пояснювальної записки та графічної частини дипломного проекту

Графічна частина складається з 16 слайдів мультимедійної презентації, виконаної у програмному продукті MS PowerPoint, які містять структурні, принципові та функціональні схеми, фото роботи модернізованого пристрою, блок-схеми алгоритмів, передбачені технічним завданням. Пояснювальна записка виконана акуратно та у відповідності до норм. Якість виконання пояснювальної записки відмінна, розробку виконано у повному обсязі.

# ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Основний розділ.....	8
1.1 Аналіз існуючих тестерів напівпровідникових транзисторів.....	8
1.1.1 Тестер транзисторів у складі цифрових мультиметрів.....	8
1.1.2 Китайські тестери транзисторів LCR-TC1, GM328A.....	9
1.1.3 Тестери компанії Peak Atlas DCA55/DCA75.....	11
1.1.4 Tektronix Keithley 4200A-SCS (характеріограф).....	11
1.1.5 Автоматизовані вимірювальні системи.....	12
1.1.6 Порівняння та висновки.....	13
1.2 Аналіз параметрів різних типів транзисторів.....	14
1.2.1 Аналіз параметрів біполярних транзисторів.....	15
1.2.2 Аналіз параметрів польових транзисторів.....	20
1.3 Аналіз принципів роботи тестера напівпровідникових транзисторів та структурної схеми.....	23
1.3.1 Вимірювання ємності переходів транзистора.....	24
1.3.2 Формування напруги для побудови ВАХ транзистора.....	25
1.3.3 Вимірювання струму, що протікає через транзистор.....	27
1.3.4 Вимірювання напруги на переходах транзистора.....	28
1.3.5 Обмеження вихідного струму транзистора.....	29
1.3.6 Вхід для вимірюваного транзистора.....	31
1.3.7 Обмеження діапазону напруги на виході ЦАП.....	32
1.3.8 Основні функції блоку управління.....	34
1.3.9 Структурна схема тестеру транзисторів на AVR-мікроконтролері.....	36
1.4 Модернізація принципової електричної схеми тестеру.....	37
1.4.1 Захист портів ATmega.....	40
1.4.2 Використання поворотного енкодера.....	42
1.4.3 Підключення графічного кольорового дисплея.....	44

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		5

1.5 Розробка блок-схем тестування транзисторів за допомогою модернізованого тестеру.....	46
1.5.1 Алгоритм вимірювання напівпровідникових елементів.....	52
1.5.2 Алгоритм вимірювання P N P транзистора або P-Channel MOSFET.....	54
1.5.3 Алгоритм вимірювання N P N транзистора або N-Channel-MOSFET.....	57
1.6 Отримання результатів вимірювання параметрів транзисторів за допомогою модернізованого тестеру.....	59
2 Економічний розділ.....	63
3 Розділ охорони праці та техніки безпеки.....	68
3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів.....	68
3.2 Гігієнічні вимоги до виробничого середовища.....	69
3.3 Вимоги безпеки праці працівника.....	70
3.4 Правила безпеки праці при паянні.....	70
3.5 Пожежна безпека.....	71
Висновки.....	73
Перелік використаних інформаційних джерел.....	74
Додаток А. Слайди мультимедійної презентації.....	75

## ВСТУП

Сучасні напівпровідникові компоненти є основою більшості електронних пристроїв, тому їх якісне тестування відіграє ключову роль у діагностиці та ремонті електроніки. Однак існуючі тестери транзисторів не завжди забезпечують достатню точність і надійність вимірювань. Більшість таких приладів орієнтовані лише на вимірювання одного або двох параметрів, що свідчить про достатність такого підходу для більшості завдань. Однак бувають випадки, коли потрібно отримати додаткову інформацію щодо роботи транзистора. Тому актуальним є питання модернізації таких пристроїв.

У даному дипломному проєкті розглядається модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на основі мікроконтролера ATmega328. Основна мета – підвищення точності вимірювань, забезпечення зручного відображення результатів та оптимізація енергоспоживання. Для цього тестер буде оснащений графічним дисплеєм роздільною здатністю 128×64 пікселів (з контролером ST7565 або SSD1306) та підтримкою інтерфейсів SPI або I2C. Управління тестуванням здійснюватиметься натисканням кнопки TEST, після чого пристрій автоматично вимикатиметься при завершенні вимірювання.

Оскільки тестер може працювати від автономного джерела живлення, критично важливо мінімізувати енергоспоживання. У вимкненому стані струм споживання не перевищуватиме 20 нА, а для зменшення витрат енергії у режимі очікування застосовуватиметься функція Sleep Mode.

Пристрій буде здатний автоматично визначати тип напівпровідникового елемента (N-P-N і P-N-P біполярні транзистори, MOSFET, JFET), а також його розташування виводів. Додатково проводитиметься вимірювання ключових параметрів, таких як коефіцієнт підсилення та порогова напруга база-емітер. Час тестування більшості компонентів не перевищуватиме 2 секунд, хоча вимірювання ємності або індуктивності може вимагати більше часу.

Таким чином, реалізація модернізованого тестеру забезпечить більш ефективне та зручне тестування напівпровідникових транзисторів, що є важливим як для ремонту, так і для розробки електронних схем.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

# 1 ОСНОВНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Аналіз існуючих тестерів напівпровідникових транзисторів

Сучасні тестери напівпровідникових транзисторів можуть значно відрізнятись за функціональністю, точністю вимірювань та принципом роботи. Більшість з них обмежується лише базовими вимірюваннями, такими як визначення типу транзистора, перевірка справності та вимірювання коефіцієнта підсилення струму ( $hFE$ ) у біполярних транзисторів. Деякі пристрої також можуть визначати порогову напругу відкриття MOSFET-транзисторів або оцінювати паразитні зворотні струми.

Однак, навіть більш функціональні моделі мають обмеження. Наприклад, тестери, вбудовані в мультиметри, зазвичай можуть лише перевіряти працездатність транзистора без отримання детальної інформації про його характеристики. З іншого боку, спеціалізовані прилади, такі як характеріографи, дозволяють будувати вольт-амперні характеристики (ВАХ) транзисторів, але їх використання вимагає складного та дорогого обладнання.

Для оцінки існуючих рішень у цьому розділі буде проведено огляд кількох популярних моделей тестерів транзисторів, їх можливостей, переваг та недоліків.

### 1.1.1 Тестер транзисторів у складі цифрових мультиметрів

Одним з найпоширеніших методів тестування транзисторів є використання мультиметрів, які мають спеціальні гнізда для вимірювання коефіцієнта підсилення струму біполярного транзистора. Деякі з таких мультиметрів також можуть визначати тип транзистора (PNP або NPN) та перевіряти справність переходів. Переваги тестерів транзисторів у складі цифрових мультиметрів:

- Простота використання;
- Доступність і низька вартість;
- Вбудованість у мультиметр, що робить пристрій універсальним.

Недоліки Переваги тестерів транзисторів у складі цифрових мультиметрів:

- Обмежені можливості вимірювань (тільки  $hFE$ );

					КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

- Відсутність підтримки польових транзисторів;
- Відсутність автоматичного визначення розташування виводів.

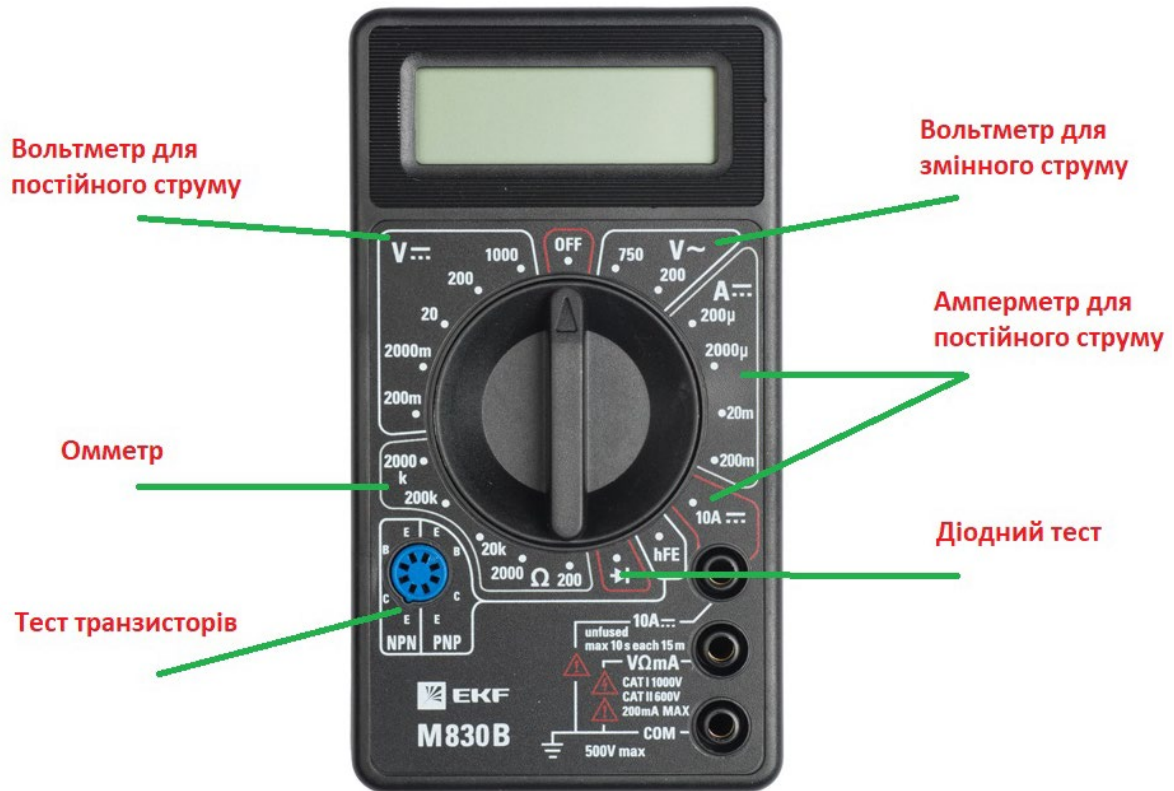


Рисунок 1.1. Цифровий мультиметр M830B

### 1.1.2 Китайські тестери транзисторів LCR-TC1, GM328A

Окремий клас бюджетних тестерів транзисторів, таких як LCR-TC1, GM328A, побудований на базі мікроконтролерів AVR (ATmega328). Вони підтримують широкий набір функцій, зокрема:

- Автоматичне визначення типу транзистора (NPN, PNP, MOSFET, JFET);
- Визначення розташування виводів;
- Вимірювання коефіцієнта підсилення  $hFE$ , порогової напруги MOSFET, опору відкритого каналу;
- Тестування інших пасивних компонентів (резисторів, конденсаторів, діодів, індуктивностей).

Переваги тестерів транзисторів LCR-TC1, GM328A:

- Автоматичне визначення параметрів;
- Великий набір функцій для тестування різних компонентів;
- Відносно невисока вартість.

### Недоліки тестерів транзисторів LCR-TC1, GM328A:

- Низька точність вимірювань;
- Повільне тестування ( $\approx 2-3$  с);
- Відсутність підтримки складних вимірювань, таких як ВАХ транзисторів.

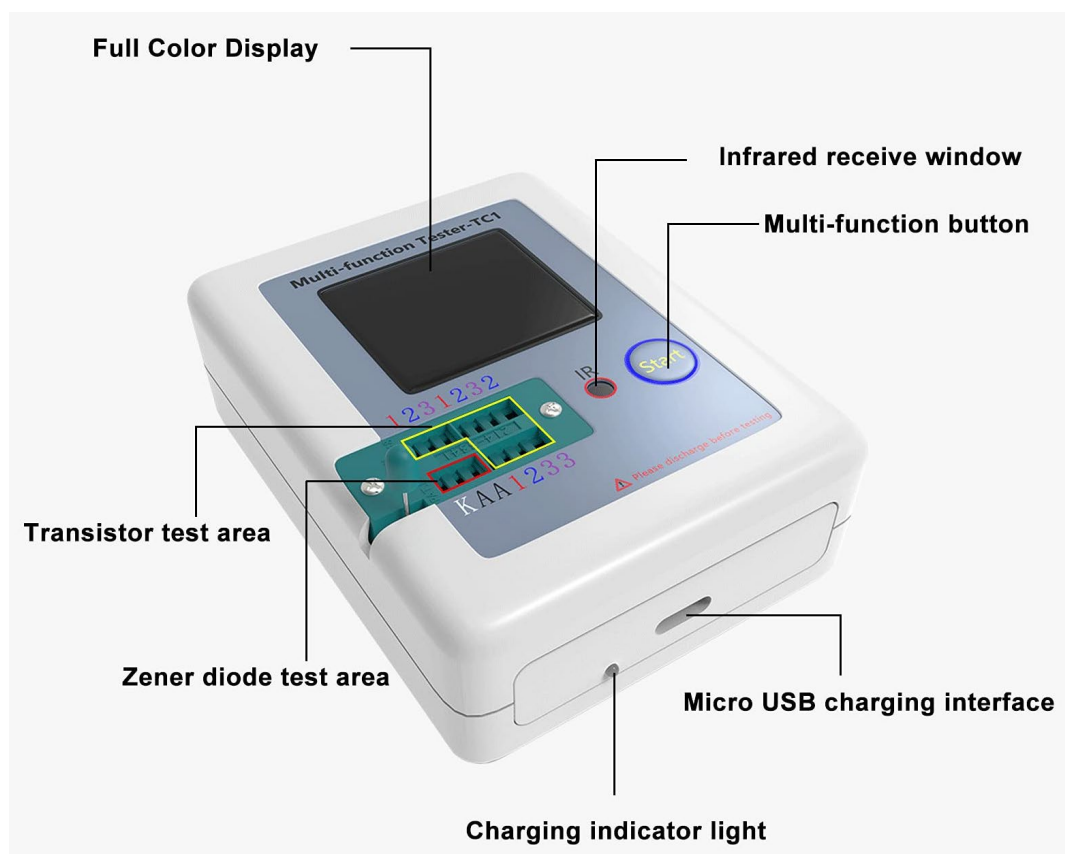


Рисунок 1.2. Тестер транзисторів LCR-TC1

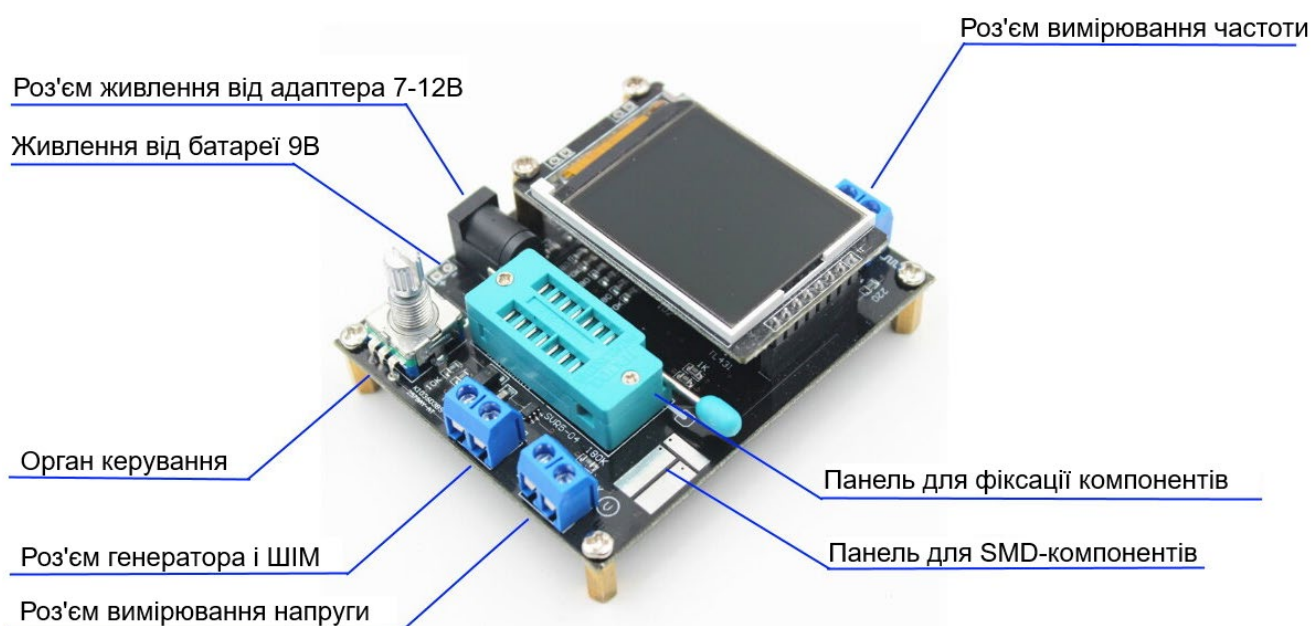


Рисунок 1.3. Тестер транзисторів GM328A

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ

Арк.

10

### 1.1.3 Тестери компанії Peak Atlas DCA55/DCA75

Peak Atlas DCA55 і його розширена версія DCA75 — це напівпрофесійні тестери транзисторів, які забезпечують детальніші вимірювання у порівнянні з китайськими аналогами. Вони дозволяють визначати не лише тип транзистора і розташування виводів, а й основні параметри, такі як порогова напруга та струм витоку.

Переваги Peak Atlas DCA55/DCA75:

- Вища точність вимірювань;
- Зручний дисплей з текстовими підказками;
- Вимірювання декількох ключових параметрів транзисторів.

Недоліки Peak Atlas DCA55/DCA75:

- Висока вартість у порівнянні з бюджетними тестерами;
- Відсутність можливості підключення до ПК для аналізу результатів.



Рисунок 1.4. Тестер транзисторів Peak Atlas DCA55

### 1.1.4 Tektronix Keithley 4200A-SCS (характеріограф)

Tektronix Keithley 4200A-SCS – це вимірювальна система для комплексного аналізу напівпровідникових пристроїв, включаючи транзистори. Вона дозволяє отримати детальну інформацію про електричні характеристики компонентів, будувати вольт-амперні характеристики (ВАХ) та визначати модельні параметри

транзисторів.

Основні можливості Tektronix Keithley 4200A-SCS:

- Побудова ВАХ біполярних та MOSFET-транзисторів;
- Визначення порогової напруги, крутизни характеристики, струмів витоку;
- Автоматизований аналіз характеристик напівпровідникових структур;
- Підключення до комп'ютера з можливістю керування через спеціалізоване програмне забезпечення.

Переваги Tektronix Keithley 4200A-SCS:

- Висока точність вимірювань;
- Можливість автоматизації тестування;
- Підтримка великої кількості напівпровідникових компонентів.

Недоліки Tektronix Keithley 4200A-SCS:

- Дуже висока вартість;
- Великий розмір і складність у використанні.



Рисунок 1.5. Характеріограф Tektronix Keithley 4200A-SCS

### 1.1.5 Автоматизовані вимірювальні системи

Деякі лабораторії та виробники використовують комплексні вимірювальні системи, які поєднують декілька спеціалізованих пристроїв для точного аналізу транзисторів. Наприклад, системи від Keysight або Rohde & Schwarz дозволяють

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

проводити детальний аналіз усіх параметрів транзистора, включаючи його модельні характеристики.

Переваги автоматизованих вимірювальних систем:

- Найвища точність і широкий функціонал;
- Можливість проведення складних вимірювань;
- Підтримка роботи з програмним забезпеченням для подальшого аналізу.

Недоліки автоматизованих вимірювальних систем:

- Дуже висока вартість;
- Великий розмір і складність у використанні.

### 1.1.6 Порівняння та висновки

На основі аналізу можна зробити висновок, що кожен тип тестерів має свої переваги та обмеження. Прості мультиметри підходять лише для базових перевірок, бюджетні китайські тестери мають широкий функціонал, але низьку точність, професійні пристрої Peak Atlas забезпечують точніші вимірювання, але мають обмежені можливості. Характеріографи та автоматизовані вимірювальні системи є найбільш точними, але дорогими та складними у використанні.

Для модернізації тестера на ATmega328 доцільно врахувати такі особливості:

- Автоматичне визначення типу транзистора та розташування виводів (як у LCR-TC1, GM328A);
- Відображення результатів на графічному дисплеї для зручного аналізу (як у Peak Atlas DCA75);
- Оптимізація швидкості тестування (зменшення часу вимірювань до 2 с або менше);
- Енергозбереження та робота від автономного джерела живлення (використання Sleep Mode);
- Розширення точності вимірювань.

Таким чином, модернізований тестер буде поєднувати переваги бюджетних та професійних моделей, забезпечуючи оптимальне співвідношення функціональності, точності та вартості.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

## 1.2 Аналіз параметрів різних типів транзисторів

На сьогодні науковою спільнотою було розроблено десятки різноманітних моделей для різних типів напівпровідникових пристроїв, зокрема біполярних та МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) транзисторів. Різні моделі описують роботу різних підтипів цих двох загальних типів транзисторів, такі як вертикальні або горизонтальні біполярні, або ж монолітні та силові дискретні МДН-транзистори тощо. Кожна з таких моделей намагається якнайкраще описати фізичну природу приладу.

В рамках одного підтипу напівпровідникових приладів існують моделі різних рівнів – від простіших до більш комплексних. Моделі нижчих рівнів враховують фізичні явища всередині напівпровідників, які пояснюють загальну форму ВАХ (вольт-амперної характеристики) елемента. Натомість вони упускають ефекти вищих порядків, які проявляються, наприклад, при дуже високих або дуже низьких рівнях струму та/або напруги. Більш високорівневі моделі є, як правило, уточненням попередніх простіших та враховують ефекти, що проявляються в різних режимах роботи. Окремо можна виділити моделі, які не є загальноживаними та розробляються різними компаніями самостійно для опису роботи власної продукції. В своєму вигляді модель транзистора є ніщо інше, як набір параметрів та рівнянь, що описують залежності змінних – струмів та напруг на виводах – один між одним та цими параметрами. Набір таких параметрів дозволяє промоделювати роботу приладу в спеціальному середовищі – SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) симуляторі.

Існує два способи визначення параметрів моделей:

1. Теоретичний розрахунок на основі фізичної теорії напівпровідників та відомих параметрів технології виробництва;
2. Проведення дослідів з виготовленим пристроєм та аналіз вимірних результатів.

Останній краще забезпечує точність відтворення характеристик готового пристрою та користується більшою популярністю. Цей спосіб називається екстракцією параметрів.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		14

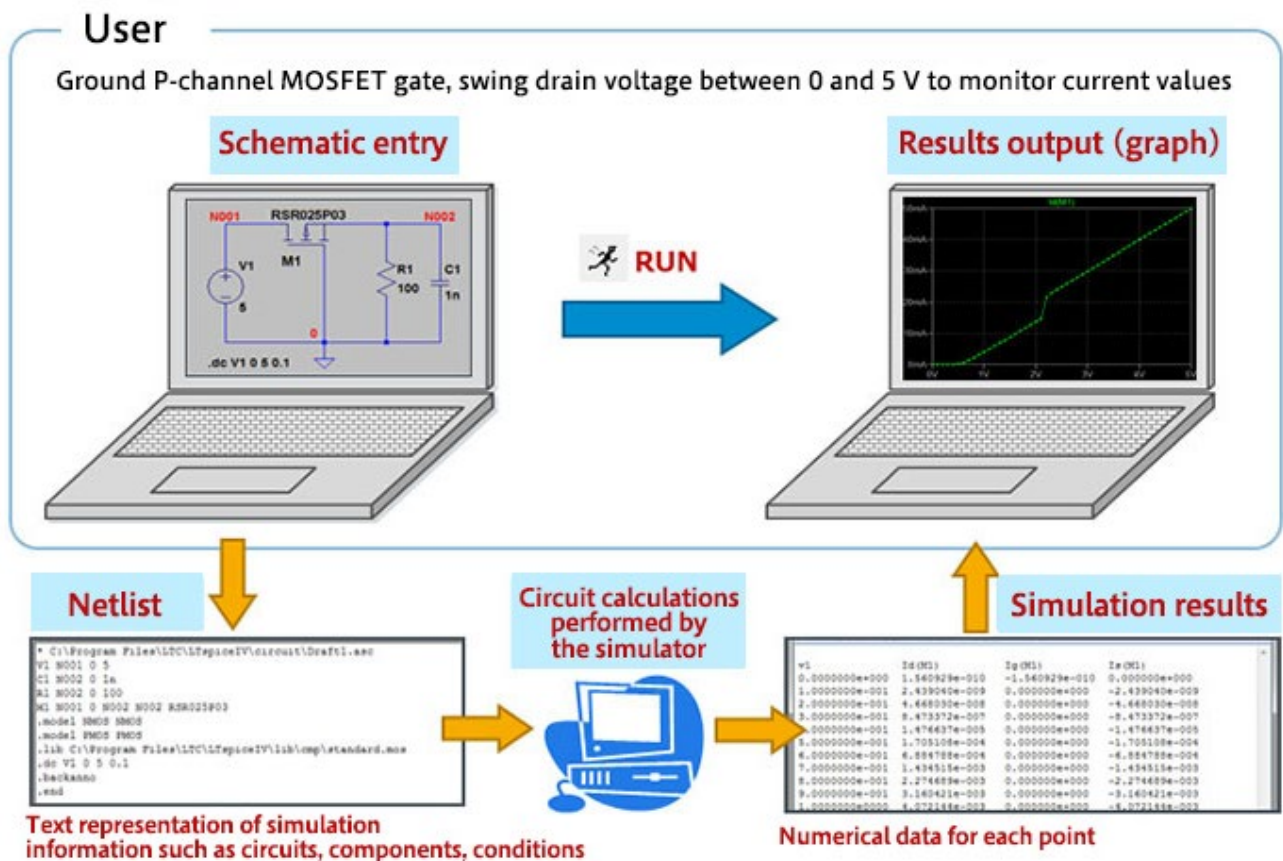


Рисунок 1.6. Моделювання роботи транзистору у симуляторі SPICE

На сьогодні не існує єдиного способу екстракції параметрів моделі. Різні методики використовують різні набори вимірних даних для подальшого аналізу, а також різні алгоритми обробки цих даних із застосуванням оптимізації або регресії. Найпростішим же способом є пряма екстракція, яка заснована на безпосередньому використанні вимірних ВАХ транзисторів шляхом аналізу нахилу графіка та його точок перетину з осями тощо. Перш ніж виконувати екстракцію параметрів, необхідно здійснити необхідні виміри для отримання вихідних даних. Комплексні моделі високого рівня потребують великого набору даних та дорогого точного вимірювального обладнання для спостереження всіх нюансів поведінки приладу. Параметри простіших моделей можуть бути отримані завдяки вимірам ВАХ в основних режимах роботи транзисторів та ємностей у невеликому діапазоні постійних напруг.

### 1.2.1 Аналіз параметрів біполярних транзисторів

Біполярні транзистори є одними з найважливіших компонентів сучасної електроніки, широко використовуваними в підсилювачах, перемикачах та інших

аналогових і цифрових схемах. Для аналізу характеристик цих пристроїв застосовуються математичні моделі, які дозволяють прогнозувати їхню поведінку в електронних схемах.

Класичними моделями, що описують фізичні процеси у біполярних транзисторах, є модель Ебберса-Молла та її вдосконалена версія — модель Гуммеля-Пуна. Остання використовується переважно для моделювання транзисторів в інтегральних схемах, тоді як для аналізу дискретних транзисторів зазвичай достатньо першої.

Подібно до рівнів складності моделей, у межах кожної моделі існують основні та другорядні параметри. Основні SPICE-параметри для моделі Ебберса-Молла наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1. Основні SPICE-параметри моделі біполярного транзистора

<i>SPICE-параметр</i>	<i>Позначення</i>	<i>Назва параметра</i>	<i>Одиниці вимірювання</i>
IS	$I_s$	Струм насичення	А
BF	$\beta_f$	Ідеальний коефіцієнт підсилення струму	–
VAf	$V_{Af}$	Напруга Ерлі	В
CJE	$C_{je}$	Бар'єрна ємність база-емітерного переходу при нульовому зміщенні	Ф
CJC	$C_{jc}$	Бар'єрна ємність база-колекторного переходу при нульовому зміщенні	Ф

Структуру перерізу типового вертикального n-p-n біполярного транзистора показано на рис. 1.7.

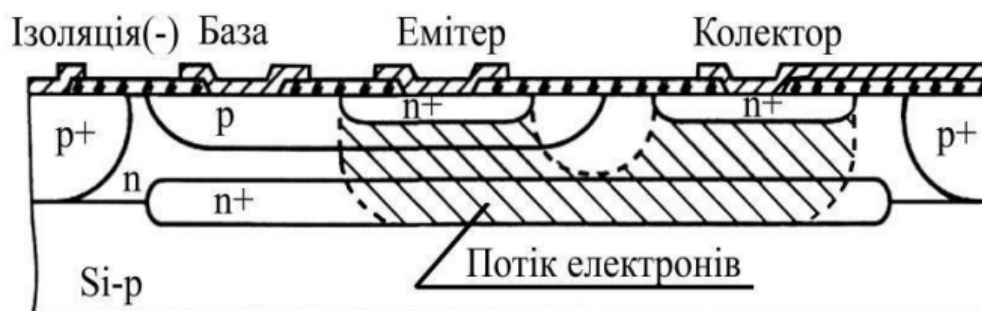


Рисунок 1.7. Структура транзистора n-p-n типу

Функціонування біполярного транзистора ґрунтується на процесах дифузії носіїв заряду через напівпровідникові переходи. Основний механізм роботи

полягає в тому, що при прямому зміщенні р-п переходу база-емітер зарядові носії (електрони у випадку при транзистора) дифундують з емітера в базу, а потім спрямовуються до колектора. При цьому струм колектора експоненційно залежить від напруги база-емітер згідно з рівнянням:

$$I_c = I_s \cdot \exp\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right) \quad (1.1)$$

де:

- $I_c$  – струм колектора,
- $I_s$  – струм насичення,
- $V_{be}$  – напруга база-емітер,
- $V_T$  – температурний потенціал, що дорівнює 26 мВ при кімнатній температурі.

Струм бази, в свою чергу, пов'язаний із струмом колектора співвідношенням:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta_f} \quad (1.2)$$

Звідси випливає формула:

$$I_c = \beta_f \cdot I_b \quad (1.3)$$

Додаткові ефекти, такі як вплив напруги колектор-емітер, враховуються через параметр напруги Ерлі ( $V_{AF}$ ):

$$I_c = I_s \exp\left(\frac{V_{be}}{V_T}\right) \left(1 + \frac{V_{ce}}{V_{AF}}\right) \quad (1.4)$$

Бар'єрні ємності переходів база-емітер ( $C_{je}$ ) і база-колектор ( $C_{jc}$ ) впливають на динамічну поведінку транзисторів. Хоча їх значення змінюються з напругою, у більшості випадків для практичних задач їх вимірюють у невеликому діапазоні напруг.

Різноманіття параметрів вимагає застосування комплексних методик вимірювання, що можуть бути реалізовані як окремими приладами, так і за допомогою спеціалізованих автоматизованих систем, що інтегруються у тестери.

Для отримання таких параметрів, як ( $I_s$ ) та ( $\beta$ ), зазвичай використовують

побудову вольт-амперних характеристик (ВАХ) транзистора (рис. 1.8).

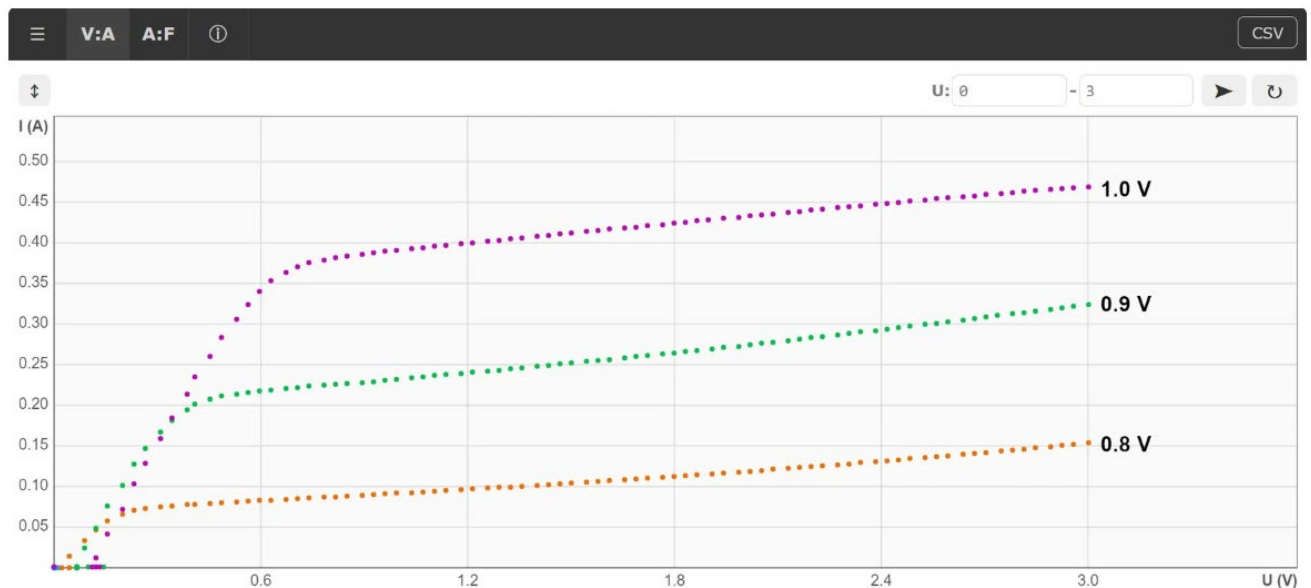


Рисунок 1.8. Вольт-амперна характеристика (ВАХ) біполярного транзистора

За допомогою вимірювань струму при різних значеннях напруги база-емітер проводиться побудова графіка, де експоненціальна залежність перетворюється у лінійну (при використанні логарифмічної шкали). Нахил цієї прямої дозволяє визначити температурний потенціал ( $V_T$ ) (близько 26 мВ при кімнатній температурі), а її перетин із віссю — оцінити ( $I_S$ ).

Використовуючи результати вимірювань струмів бази і колектора, розраховується пара співвідношення ( $I_C/I_B$ ), що дає можливість оцінити коефіцієнт передачі ( $\beta$ ).

Вимірювання вихідних характеристик проводяться для різних значень струму бази. На основі сімейства графіків визначається вплив напруги ( $V_{CE}$ ) на струм колектора, що дає змогу за допомогою апроксимації визначити ( $V_{AF}$ ).

Для визначення бар'єрних ємностей ( $C_{BE}$ ) та ( $C_{BC}$ ) використовують методи, що базуються на імпульсному тестуванні або аналізі змінних характеристик при малих напругах. Оскільки ці ємності залежать від частоти, при вимірюваннях застосовуються генератори сигналів з регульованим діапазоном частот, що дозволяє побудувати частотні характеристики параметрів транзистора. Тут особлива увага приділяється впливу паразитних ємностей і утворенню резонансних контурів у високочастотному режимі.

Для малопотужних моделей транзисторів, які використовуються у звичайних логічних схемах та аналогових підсилювачах, основний акцент робиться на точному визначенні ( $\beta$ ) та ( $I_S$ ). Тут вимірювання проводяться у стандартному діапазоні струмів і напруг, і методика логарифмічного аналізу дозволяє достатньою мірою оцінити статичні параметри.

Для транзисторів, що працюють з високими струмами і напругами, важливо врахувати температурні ефекти та можливе нелінійне збільшення струму колектора за рахунок зменшення активної бази. Вимірювання проводяться із застосуванням спеціалізованих платформи та ізолюючих елементів, що дозволяє отримувати надійні дані навіть за високих навантажень.

При дослідженні параметрів, що залежать від частоти, особливо важливими є вимірювання при змінному струмі. Тут застосовують мережеві аналізатори та генератори високочастотних сигналів, що дають змогу оцінити поведінку транзистора в діапазонах, де динамічні ємності роблять основний вплив на сигнал.

В рамках даного дипломного проекту, спрямованого на модернізацію тестера напівпровідникових транзисторів із використанням AVR-мікроконтролера, важливо врахувати інтеграцію передових методик вимірювання параметрів біполярних транзисторів. Запропонований підхід має включати:

- Автоматизацію процедури збору даних: Використання мікроконтролера дозволяє автоматично проводити серії вимірювань, зокрема, будувати лінійні графіки на логарифмічній шкалі для екстраполяції ( $I_S$ ) та визначення ( $\beta$ );
- Мультифункціональність приладу: Розроблений тестер має підтримувати як DC-вимірювання для аналізу статичних параметрів, так і різноманітні AC-вимірювання для оцінки динамічних характеристик транзисторів, таких як частотна залежність бар'єрних ємностей;
- Адаптивність до різних типів пристроїв: Тестер повинен бути налаштований на роботу з широким спектром біполярних транзисторів – від малопотужних до високопотужних. Це забезпечується застосуванням різних режимів вимірювань і відповідних алгоритмів обробки отриманих даних.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

## 1.2.2 Аналіз параметрів польових транзисторів

На відміну від біполярних транзисторів, в яких керування здійснюється струмом, польові (МДН) транзистори, зокрема MOSFET та JFET, сьогодні займають домінуюче місце у виробництві напівпровідникових пристроїв. Сучасна технологія пропонує десятки різних рівнів моделей МДН-транзисторів, що залежать від складності конструкції, технологічних особливостей і довжини каналу. Для дискретних силових пристроїв зазвичай використовується найпростіша модель першого рівня, основні параметри якої наведено в таблиці 1.2).

Таблиця 1.2. Основні SPICE-параметри моделі польового транзистора

<i>SPICE-параметр</i>	<i>Позначення</i>	<i>Назва параметра</i>	<i>Одиниці вимірювання</i>
<i>KP</i>	<i>Kp</i>	Передавальна провідність	$A \cdot B^{-2}$
<i>VTO</i>	<i>Vto</i>	Порогова напруга (ступінь інверсії, що запускає провідність)	B
$\lambda$	$\lambda$	Параметр модулювання каналу (залежність струму від $V_{ds}$ )	$B^{-1}$
<i>CGS</i>	<i>Cgs</i>	Ємність затвор–витік при нульовому зміщенні	$\Phi$

У МДН-транзисторах керування здійснюється за допомогою напруги між затвором і витіком ( $V_{gs}$ ). Прикладення цієї напруги спричиняє явище інверсії в каналі, яке починається після досягнення порогової напруги ( $V_{to}$ ). Після її перевищення канал починає проводити струм стоку ( $I_d$ ). У режимі насичення струм стоку підпорядковується квадратичному закону:

$$I_d = K_p \cdot (V_{gs} - V_{to})^2 \quad (1.5)$$

де ( $K_p$ ) відображає ефективність передавання сигналу (тобто передавальну провідність), а ( $V_{to}$ ) – критичну напругу, після якої відбувається інверсія. Для більш детального аналізу враховується також вплив напруги стік-витік ( $V_{ds}$ ) – так званий ефект модуляції каналу. Формула приймає розширений вигляд:

$$I_d = K_p \cdot (V_{gs} - V_{to})^2 \cdot (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \quad (1.6)$$

де ( $\lambda$ ) характеризує зміну струму стоку через зміну напруги на стік-витік.

Крім цього, важливу роль відіграє ємність затвор-витік  $C_{gs}$ , що впливає на частотні характеристики транзистора та його здатність працювати в режимах високошвидкісного перемикачання.

Вимірювання основних параметрів МДН-транзисторів проводиться за допомогою методик, які подібні до тих, що застосовуються для біполярних транзисторів, але враховують особливості керування напругою:

1. Передавальна характеристика та визначення ( $V_{to}$ ) і ( $K_p$ ):

- Виконується серія вимірювань струму стоку ( $I_d$ ) у залежності від напруги затвор-витік ( $V_{gs}$ ).
- Для отримання лінійного сегмента трансферної характеристики будується графік залежності квадратного кореня струму стоку, ( $\sqrt{I_d}$ ), від ( $V_{gs}$ ).
- Лінійна апроксимація цього графіку у зоні низьких струмів дозволяє однозначно визначити порогову напругу ( $V_{to}$ ) (точка перетину лінії з віссю ( $V_{gs}$ )) та розрахувати ( $K_p$ ) через квадрат нахилу отриманої прямої:

$$K_p = \left( \frac{d, \sqrt{I_d}}{d, V_{gs}} \right)^2 \quad (1.7)$$

2. Визначення параметру ( $\lambda$ ) за допомогою вихідних характеристик:

- Для фіксованого значення ( $V_{gs}$ ) проводяться вимірювання залежності ( $I_d$ ) від ( $V_{ds}$ );
- Аналіз сімейств вихідних характеристик дозволяє апроксимувати лінійну частину і визначити ( $\lambda$ ) як показник зміни ( $I_d$ ) від ( $V_{ds}$ ) у режимі насичення.

3. Динамічні та високочастотні вимірювання: Витяг паразитних ємностей, зокрема ( $C_{gs}$ ), здійснюється за допомогою імпульсного тестування або АС-вимірювань із використанням генераторів високочастотних сигналів і мережевих аналізаторів. Це дозволяє побудувати частотні характеристики і визначити вплив паразитних параметрів на загальну поведінку пристрою.

Методика екстракції параметрів адаптується залежно від конструктивних особливостей типу біполярного транзистора:

- n-канальні МДН-транзистори: Стандартна структура таких пристроїв (як

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

показано на рис. 1.9) дозволяє застосовувати універсальні методи екстраполяції ( $V_{to}$ ) і ( $K_p$ ). Основний акцент роблять на визначенні порогової напруги, що є ключовим для роботи транзистора;

- Силові дискретні МДН-транзистори: У випадку високопотужних пристроїв необхідно враховувати термічні ефекти та можливе зміщення параметрів при високих струмах і напругах. Тут вимірювання проводяться із застосуванням спеціальних методик із охолодженням і ізоляцією для забезпечення стабільності та точності даних.

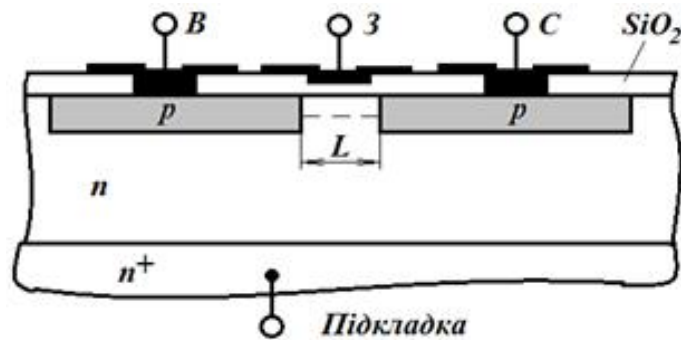


Рисунок 1.9. Структура n-канального польового транзистора

У рамках даного дипломного проекту, спрямованого на модернізацію тестера напівпровідникових транзисторів на базі AVR-мікроконтролера, важливо забезпечити комплексний підхід до вимірювання як статичних, так і динамічних параметрів МДН-транзисторів. Тестер повинен реалізовувати наступні функції:

- Автоматизація збору даних трансферних характеристик: Мікроконтролер забезпечить автоматичну вимірювальну процедуру, де залежність ( $I_d$ ) від ( $V_{gs}$ ) буде перетворена у графік з подальшою апроксимацією для визначення ( $V_{to}$ ) та ( $K_p$ );
- Врахування ефектів модуляції каналу: За допомогою аналізу рівнянь із залежністю від ( $V_{ds}$ ) визначатимуться параметри модуляції каналу ( $\lambda$ ), що є критичними для точного опису роботи силових транзисторів;
- Проведення високочастотного аналізу: Вбудовані можливості пристрою дозволять проводити динамічні вимірювання для оцінки паразитних ємностей та інших високочастотних характеристик, що впливають на швидкість перемикання транзисторів.

### 1.3 Аналіз принципів роботи тестера напівпровідникових транзисторів та структурної схеми

У проекті модернізації тестера транзисторів на базі мікроконтролера ATmega328 основна увага приділяється автоматизації процесу вимірювання та візуалізації результатів безпосередньо на графічному дисплеї. Функціональність пристрою розділяється на два взаємодоповнюючі етапи: збір вимірювальних даних з подальшою обробкою та виведення результатів на екран. Це дозволяє одразу отримувати користувачем повну інформацію про основні статичні та динамічні параметри транзистора.

На першому етапі тестер виконує автоматизоване вимірювання параметрів досліджуваного транзистора. Для цього в системі передбачено два незалежних блоки:

- Блок вимірювання статичних параметрів. Він забезпечує збір даних за допомогою аналогово-цифрових перетворювачів (ADC) мікроконтролера, що дозволяє отримати вольт-амперні характеристики, визначити коефіцієнт підсилення, порогову напругу та інші важливі статичні показники. Даний блок орієнтований на збір детальних даних через стандартні методики, зокрема аналіз логарифмічних графіків для екстраполяції мінімального струму та визначення критичних параметрів;
- Блок вимірювання динамічних параметрів. Цей модуль дозволяє проводити імпульсні та АС-вимірювання для отримання значень нелінійних параметрів, таких як бар'єрні ємності (затвор-витік, база-емітер для біполярних транзисторів або подібні параметри для МДН-транзисторів), що визначають частотну поведінку пристрою. Завдяки прямому збору цих даних не вимагається суттєва додаткова обробка – отримані результати одразу інтегруються в загальну модель пристрою.

Обидва блоки синхронно працюють під керуванням спільного блоку управління, який реалізовано на базі ATmega328. Управління вимірюваннями та обробка даних відбувається автоматично після однократного натискання кнопки «TEST». Завдяки спеціально розробленим алгоритмам, результати

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

опрацьовуються в режимі реального часу. Вони одразу відображаються на графічному дисплеї з роздільною здатністю 128×64 пікселів, що оснащено контролерами ST7565 або SSD1306. Такий підхід не лише надає наочну візуальну інтерпретацію даних, але й дозволяє швидко оцінити параметри транзистора без необхідності передачі даних на ПК.

Особливу увагу в проекті приділено оптимізації енергоспоживання. Завдяки використанню режиму сну (Sleep Mode) мікроконтролера, пристрій може працювати від автономного джерела живлення, а споживання струму у вимкненому стані не перевищує 20 нА. Після завершення процедури вимірювання, пристрій автоматично переходить у режим зниженого споживання, що є надзвичайно корисним для портативних і батарейних застосувань.

### 1.3.1 Вимірювання ємності переходів транзистора

В рамках проекту модернізації тестера транзисторів на базі ATmega328 важливою задачею є точне визначення динамічних параметрів, серед яких ємність транзистора. Для цього реалізовано спеціалізований вимірювальний блок, що працює за принципом аналізу RC-кола, сформованого транзистором та резистором із відомим опором. Процес вимірювання ємності базується на наступній методиці:

1. Формування RC-кола. Транзистор підключається послідовно з резистором, значення якого завідомо задане. До цього RC-кола прикладається сигнал змінної напруги з відомою частотою та амплітудою.

2. Розподіл напруги в колі. Згідно із законом Ома для змінного струму, вхідний сигнал ділиться між резистором та ємністю транзистора. За рахунок цього на контактах ємності виникає сигнал, амплітуда якого залежить від величини вимірюваної ємності.

3. Пікова детекція сигналу. На виході RC-кола застосовано піковий детектор, який визначає максимальне значення напруги, що виникло на ємності у відповідь на прикладений сигнал. Це дозволяє уникнути необхідності збору багатьох точок сигналу в часовій області для знаходження амплітуди.

4. АЦП і обчислення ємності. Після пікової детекції значення напруги

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

надходить на аналогово-цифровий перетворювач, що реалізовано у мікроконтролері. За допомогою відомих параметрів кола — опору ( $R$ ) та частоти сигналу ( $\omega$ ) — обчислюється ємність за аналізом спадання амплітуди сигналу.

Комплексну передавальну функцію інтегруючого RC-кола можна подати у вигляді:

$$\frac{U_{\text{вих}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (1.8)$$

що описує як амплітудну, так і фазову залежність вихідного сигналу від вхідного. Амплітуда вихідного сигналу визначається за:

$$\left| \frac{U_{\text{вих}}(j\omega)}{U_{\text{вх}}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (1.9)$$

Перетворивши це рівняння, отримуємо формулу для визначення ємності:

$$C = \frac{1}{\omega R} \sqrt{\left( \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вих}}} \right)^2 - 1} \quad (1.10)$$

Вибір методу вимірювання засновано на аналізі амплітудного спадання сигналу, що спрощує реалізацію в порівнянні з визначенням параметрів за фазовим зсувом. Перевагою зазначеного підходу є його простота та надійність у впровадженні. Методика не вимагає складного збору даних з часової області, оскільки піковий детектор одразу фіксує максимальне значення напруги на конденсаторі. Однак вплив паразитних параметрів (наприклад, неідеальні опори контактів або додаткові ємності платформи) може вести до похибок, які оптимально компенсувати програмним шляхом у мікроконтролері. В контексті нашого проекту результати вимірювання ємності у поєднанні зі статичними характеристиками транзистора відображаються на графічному дисплеї (128×64 пікселів) з використанням контролера ST7565 або SSD1306, що дозволяє користувачу миттєво оцінити якість та поведінку досліджуваного компонента.

### 1.3.2 Формування напруги для побудови ВАХ транзистора

Одним із ключових аспектів проекту є забезпечення точного формування змінної напруги на контактах досліджуваного транзистора. Для побудови вольт-

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

амперних характеристик (ВАХ) і визначення інших параметрів необхідно забезпечити стабільну та регульовану напругу, яка може приймати значення від нуля до максимальної напруги живлення. У нашому проекті розглянуто два методи формування такої напруги.

Перший підхід базується на використанні ШІМ-сигналу (широкоімпульсної модуляції) разом з інтегруючим контуром. Змінюючи коефіцієнт заповнення ШІМ, можна отримати практично будь-яке середнє значення напруги на виході інтегратора. Це дозволяє формувати потрібний рівень напруги, проте має кілька недоліків. Серед них – наявність пульсацій (хоча вони і згладжуються інтеграційним контуром), а також необхідність певного проміжку часу для встановлення стабільного середнього значення, що може сповільнювати процес вимірювання при отриманні великої кількості точок ВАХ.

Другий підхід полягає у використанні спеціалізованого цифро-аналогового перетворювача (ЦАП). Незважаючи на кінцеву розрядність, яка визначає дискретність можливих вихідних значень, ЦАП забезпечує миттєве встановлення заданої напруги та практично не містить пульсацій (за винятком незначних шумів). Це дозволяє швидко та точно формувати напругу на вихідних контактах.

При аналізі вимог до вимірювання ВАХ основну увагу приділено саме характеру кривої, її формі та узагальненому вигляду характеристик, а не абсолютним значенням напруг у кожній точці. Оскільки побудова сімейства характеристик вимагає отримання великої кількості точок, миттєве встановлення кожного значення є надзвичайно важливим для скорочення часу вимірювань. З огляду на ці фактори, наш вибір однозначно падає на використання ЦАП для формування напруги.

У контексті дослідження транзисторів, що мають три контакти, один з них (наприклад, емітер для біполярних транзисторів або субстрат для МДН-транзисторів) підключається до фіксованого потенціалу, а на інших двох контактах за допомогою незалежних каналів ЦАП формується змінна напруга. Це дозволяє одержувати потрібну напругу між парою контактів у заданому діапазоні. Для забезпечення паралельного управління напругою на двох різних контактах

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		26

необхідно використовувати два окремі канали ЦАП, що дозволяють стабільно підтримувати задані рівні сигналу протягом всього циклу вимірювання.

### 1.3.3 Вимірювання струму, що протікає через транзистор

Вимірювання струму є ключовим етапом у визначенні статичних характеристик транзистора та дозволяє точно оцінити його поведінку в робочих режимах. Для цього в тестері використовується методика, заснована на визначенні падіння напруги на резисторі-шунті, який має відомий опір і включається послідовно з контактом транзистора.

1. Формування шляху вимірювання: Резистор із завчасно заданим значенням опору вмикається послідовно із транзистором. Всі вимірювання проводяться таким чином, що струм, який протікає через транзистор, змінюється також через резистор-шунт;

2. Зчитування напруги: За допомогою двох каналів АЦП мікроконтролера ATmega328 здійснюється зчитування величини напруги на обох кінцях резистора. Це дозволяє визначити диференціальне падіння напруги, залежно від якого за законом Ома можна точно розрахувати струм:  $I = \frac{U}{R}$ , де (I) — виміряний струм, (U) — різниця напруг на резисторі, а (R) — опір резистора з відомим значенням;

3. Зменшення впливу шумів: Щоб мінімізувати вплив шумових спотворень, вимірювання проводяться кілька разів, після чого кінцеве значення струму обчислюється як середнє арифметичне зібраних даних. Такий підхід дозволяє покращити точність та надійність отриманих даних, що є критично важливим для подальшої екстракції параметрів транзистора.

У тестері, розробленому на базі ATmega328, вимірювання струму органічно поєднується з іншими вимірювальними блоками. Отримані дані негайно передаються на центральний блок обробки, де разом із даними від блоків вимірювання напруги та ємності формуються повна характеристика пристрою. Після обробки результати відображаються на графічному дисплеї з роздільною здатністю 128×64 пікселів, що забезпечує користувачу наочну візуалізацію та швидку діагностику стану транзистора.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

### 1.3.4 Вимірювання напруги на переходах транзистора

У тестері напівпровідникових транзисторів, що модернізовано на базі ATmega328, точне визначення потенціальних значень на контактах є критичним для побудови повної моделі пристрою. При цьому слід враховувати, що напруга, сформована ЦАПом, не повністю дорівнює напрузі, яка реально відноситься до досліджуваного транзистора, оскільки значна її частина випадає на послідовному резисторі, через який протікає вимірюваний струм. Для визначення напруги на контактах транзистора організовано наступний процес:

- Корекція сигналу: Напруга, що подається з ЦАП, розподіляється між послідовним резистором та контактом транзистора, тому вимірювання проводиться безпосередньо на вузлі з'єднання резистора із транзистором. Один з каналів АЦП зчитує це значення, що є сумішшю напруги від ЦАП та падіння напруги на резисторі;
- Визначення різниці: Щоб отримати напругу, яка безпосередньо діє на досліджуваний елемент (наприклад, між базою та емітером або між затвором та витком в МДН-транзисторах), необхідно відняти від виміряного значення відому напругу, яка встановлена на фіксованому контакті (наприклад, на емітері або субстраті);
- Аналогія з вимірюванням струму: Методика вимірювання напруги практично позичається від використаного при вимірюванні струму. Як і в попередньому випадку, для зменшення впливу шумів проводяться декілька вимірювань із обчисленням середнього арифметичного, що дозволяє підвищити точність отриманих даних.

У нашому проекті, де результати вимірювання одразу відображаються на графічному дисплеї з роздільною здатністю 128×64 пікселів, процес вимірювання напруги організовано наступним чином:

- ЦАП встановлює необхідне значення напруги для створення різних робочих точок транзистора;
- Через послідовний резистор здійснюється корекція сигналу, що дозволяє одночасно виміряти і струм, і падіння напруги;

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

- Один з каналів АЦП фіксує напругу на вузлі з'єднання резистора та транзистора, після чого програмне забезпечення мікроконтролера обчислює різницю між цим значенням і рівнем напруги на фіксованому контакті (наприклад, на емітері);
- Отримані дані, після середнього арифметичного обчислення для збільшення точності, використовуються для побудови вхідної, передавальної та вихідних характеристик транзистора.

### 1.3.5 Обмеження вихідного струму транзистора

При вимірюванні характеристик транзисторів важливо уникнути ситуацій, у яких надмірний струм може призвести до пошкодження як досліджуваного пристрою, так і вимірювальної апаратури. Колектор (або стік, у випадку МДН-транзисторів) здатний пропускати дуже високі струми, особливо при підвищених струмах бази або високій напрузі затвор-витік. Тому в нашій системі модернізованого тестера запроваджено окремий блок обмеження вихідного струму, який дозволяє запобігти нанесенню непоправної шкоди пристрою.

Хоча послідовний резистор, який використовується для вимірювання струму, може деякою мірою обмежувати струм, використання його як єдиного засобу обмеження не підходить для нашого завдання. При такому підході, коли транзистор працює при максимальному струмі за технічними вимогами, велика частина напруги з виходу буфера буде падати на резисторі. Це призведе до того, що транзистор опиниться у лінійному режимі по всьому діапазону роботи ЦАП, що негативно впливає на коректність побудови ВАХ. Зокрема, при занадто низькій колектор-емітерному (або стік-виток) напрузі важко точно екстрагувати параметр напруги Ерлі, оскільки виміряна крива буде спотвореною.

Щоб уникнути подібних ситуацій, у нашій апаратурі застосовано окремий блок обмеження вихідного струму. Цей блок працює незалежно від вимірювального ланцюга, що включає резистор для зчитування струму, і відповідає за те, щоб при досягненні максимального струму згідно з технічними вимогами транзистор не працював у лінійному режимі протягом всього діапазону формування напруги. Технічна реалізація у схемі тестера є такою:

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

- Окремий блок лімітування струму. Цей спеціалізований блок контролює вихідний струм, обмежуючи його до допустимих меж, навіть коли на вході вимірювального буфера подається максимальна напруга. Завдяки цьому підхід дозволяє зберегти активний режим роботи транзистора, що є критичним для побудови коректної вихідної характеристики і подальшої екстракції параметрів, таких як напруга Ерлі.
  - Підбір послідовного резистора. Резистор, який використовується для вимірювання струму на терміналі, ретельно підібраний таким чином, що при максимальному струмі випадає достатньо напруги, щоб забезпечити роботу транзистора у бажаному активному режимі. Це дозволяє отримати коректну форму кривих ВАХ для подальшої обробки, оскільки при надмірному падінні напруги на резисторі транзистор опиниться в лінійному режимі, що недопустимо.
  - Особливості для різних контактів. Для контактів бази (або затвора у МДН-транзисторів) задачі обмеження струму вирішуються простіше за рахунок природної характеристики: через ізольований затвор у МДН-пристроях постійний струм не витікає, а у біполярних транзисторах припускається, що напруга база-емітер при вимірюванні ВАХ не перевищує 1 В. Номінал резистора для цих контактів обирається таким чином, щоб при максимальній напрузі буфера протікав струм в межах заданих специфікацій.
- На прикладі біполярного транзистора результати вимірювання вихідних характеристик можна умовно представити, як показано на рис. 1.10.

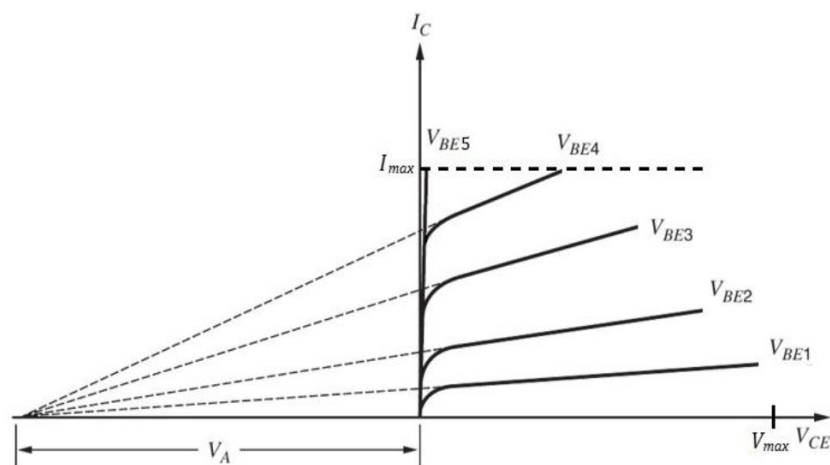


Рисунок 1.10. Вихідні характеристики біполярного транзистора

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

При цьому:

- ( $V_{max}$ ) позначає максимальну напругу, що видається буфером;
- Зі збільшенням струму колектора збільшується падіння напруги на послідовному резисторі, що знижує напругу колектор-емітер;
- При певних значеннях ( $V_{BE}(V_{BE1} - V_{BE4})$ ) струм транзистора залишається нижчим за максимальний струм буфера, що гарантує підтримання транзистора в активному режимі;
- При перевищенні цієї межі (наприклад, ( $V_{BE5}$ ) струм стає надмірним, і вихідна крива вже не придатна для визначення параметра напруги Ерлі.

### 1.3.6 Вхід для вимірюваного транзистора

Тестер передбачає універсальне дослідження характеристик як pnp, так і npn біполярних транзисторів, а також n- та р-канальних польових транзисторів. Оскільки для кожного типу проводяться вимірювання з різними режимами напруг (як позитивними, так і негативними), схема підключення пристрою повинна бути адаптована відповідно до особливостей експлуатації кожного компонента.

Основною складовою схеми є те, як транзистор підключається до стабільного потенціалу, що встановлюється як орієнтир для формування різниці напруг на його контактах. Для pnp-транзистора базовий потенціал задається за рахунок підключення емітера до землі; таким чином, зміна напруги на інших контактах (база та колектор) відбувається відносно земного потенціалу.

Для npn-транзистора, з іншого боку, емітер підключається до стабілізованого джерела живлення. Це дозволяє мікроконтролеру, який працює від однополярного живлення, формувати на виході ЦАП лише позитивні напруги, а різниця потенціалів між контактами транзистора, обчислена відносно цього стабільного рівня, буде від'ємною. Аналогічний підхід застосовується для n- та р-канальних польових транзисторів із врахуванням специфіки їх управління, де для одного типу важливо отримувати позитивну, а для іншого — негативну різницю напруг. Оскільки мікроконтролер ATmega328 має однополярне живлення та може генерувати напруги лише у позитивному діапазоні, застосування двох окремих вхідних схем дозволяє:

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

- Безпосередньо контролювати умови підключення транзистора: Для ррп-транзисторів емітер заземлюється, а для рпр — підключається до стабілізованого джерела. Таким чином, вихідна напруга, генерована ЦАП, залишається в межах позитивних значень, а різниця потенціалів між парами контактів (наприклад, база-емітер) встановлюється як негативна для рпр-транзисторів;
- Спрощення схемотехнічних рішень: Замість того, щоб впроваджувати складні схеми для генерації постійних негативних сигналів з високим струмом, що вимагали б додаткових елементів для живлення і керування, ми використали два окремі входи із власними схемами вимірювання. Це забезпечує потрібну універсальність і дозволяє мікроконтролеру працювати в стандартному діапазоні напруг, гарантуючи при цьому правильну екстракцію параметрів.

### 1.3.7 Обмеження діапазону напруги на виході ЦАП

Обмеження діапазону напруги, який генерується ЦАП, накладає певні труднощі при вимірюванні характеристик транзисторів, особливо для рпр-біполярних і р-канальних польових пристроїв. Діапазон напруги на виході ЦАП обмежений землею та його власним живленням. Проте для забезпечення високого вихідного струму використовується буфер, живлення якого зазвичай перевищує напругу, що генерується ЦАП. Такий буфер дозволяє ефективно управляти як низькими, так і високими струмами залежно від вихідної напруги.

При вимірюванні характеристик ррп-транзисторів низька напруга на виході буфера відповідає низькому струму, а висока — високому струму. У цьому випадку буфер, який може підтримувати низьку напругу при малих струмах і піднімати її до високих значень при збільшенні струму, працює за умови, що внутрішній вузол його схеми має потенціал, вищий за його вихідний. Таким чином, напруга живлення буфера перевищує верхню межу, яку формує ЦАП, що дозволяє досягнути заданих умов. Для рпр-транзисторів ситуація виглядає інакше. З прийнятим способом підключення, коли емітер рпр-транзистора підключається до потенціалу, вище, ніж напруга живлення ЦАП, проблема полягає в тому, що

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

без додаткових рішень буфер не зможе опустити свою вихідну напругу до нульового рівня, оскільки ЦАП генерує значення від 0 до  $V_{\text{ЦАП}}$ . Як наслідок, при нульовому значенні ЦАП буфер все ж триматиме деякий мінімальний рівень вихідної напруги, що забезпечує максимальний витікаючий струм. Це звужує діапазон вихідних напруг, в якому проводяться вимірювання, і, відповідно, спотворює побудову ВАХ. Для вирішення цієї проблеми впроваджено окремий блок зсуву напруги, який компенсує різницю між потенціалом, до якого підключено емітер ррп-транзистора, і напругою живлення ЦАП. Цей блок додає постійне значення зсуву, ( $U_{\text{зс}}$ ), до вихідної напруги ЦАП, що дозволяє змінити діапазон сигналу таким чином, щоб мінімальна напруга на вході буфера дорівнювала ( $U_{\text{зс}}$ ). Значення зсуву розраховується за формулою:

$$U_{\text{зс}} = U_{\text{ем}} - U_{\text{ЦАП}} \quad (1.11)$$

де ( $U_{\text{ем}}$ ) — потенціал емітера, а ( $U_{\text{ЦАП}}$ ) — напруга живлення ЦАП.

Після цього вихід блоку зсуву підключається до буфера. В результаті, при найнижчому значенні вихідної напруги блоку зсуву, буфер забезпечує відповідну мінімальну напругу, що дозволяє транзистору працювати у вказаних режимах. При цьому діапазон різниць потенціалів між емітером і другим контактом залишається рівним ( $U_{\text{ЦАП}}$ ), як це і передбачено для ррп-структур.

Оскільки аналоговий до цифровий перетворювач (АЦП), який використовується для вимірювання напруги, живиться від тієї ж напруги, що й ЦАП, він міряє значення в межах від нуля до ( $U_{\text{ЦАП}}$ ). Тому, для коректного відображення фактичних значень напруги на контактах транзистора, програмне забезпечення проводить відповідне зсування отриманих даних вниз на величину ( $U_{\text{зс}}$ ). Цей принцип зсуву напруги забезпечує узгоджені експериментальні умови для вимірювання характеристик як ррп, так і ррп-транзисторів (а також р-канальних польових транзисторів) у рамках єдиного тестера. Така схема дозволяє мікроконтролеру працювати в межах позитивного діапазону, зберігаючи при цьому вимоги до точності експериментальних умов, що зрештою сприяє коректному визначенню параметрів та подальшій екстракції характеристик, таких як напруга Ерлі.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

### 1.3.8 Основні функції блоку управління

Усі ключові операції тестера – від генерації напругового сигналу, вимірювання струму та ємності до встановлення зсуву напруги, обмеження вихідного струму та обробки отриманих даних – організовано централізовано за допомогою мікроконтролера ATmega328. Сам блок управління управляє роботою всіх вимірювальних модулів, синхронізує їх роботу та забезпечує обмін даними з ПК для подальшої обробки та візуалізації результатів. Основні функції блоку управління:

- Ініціація вимірювального процесу: Мікроконтролер приймає команди від ПК через інтерфейс UART для запуску вимірювального циклу. Після натискання кнопки „TEST“ запускається послідовність автоматизованих операцій, що включають роботу з ЦАП, АЦП, блоком зсуву напруги та іншими підсистемами, при цьому всі дані обчислюються згідно з попередньо визначеними алгоритмами;
- Інтегрована обчислювальна система: Використання сучасного мікроконтролера дозволяє реалізувати всю необхідну периферію (ЦАП, АЦП, PWM, UART) всередині одного кристалу. Це зменшує кількість зовнішніх компонентів на друкованій платі, що позитивно впливає на її компактність та надійність системи. Зокрема, АЦП використовується для точного вимірювання напруг та струмів у різних блоках, а ЦАП – для генерації стабільних напруг, необхідних для аналізу характеристик транзисторів;
- Обробка та передача даних: Після збору вимірювальних даних мікроконтролер провадить первинну обробку – середнє значення повторних вимірювань використовується для зменшення шумів. Оброблені дані негайно передаються на ПК, де спеціальне програмне забезпечення формує повну модель досліджуваного транзистора і відображає результати на графічному дисплеї. Така інтеграція дає змогу оперативно отримувати результати вимірювання та аналізувати їх без зайвих затримок;

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

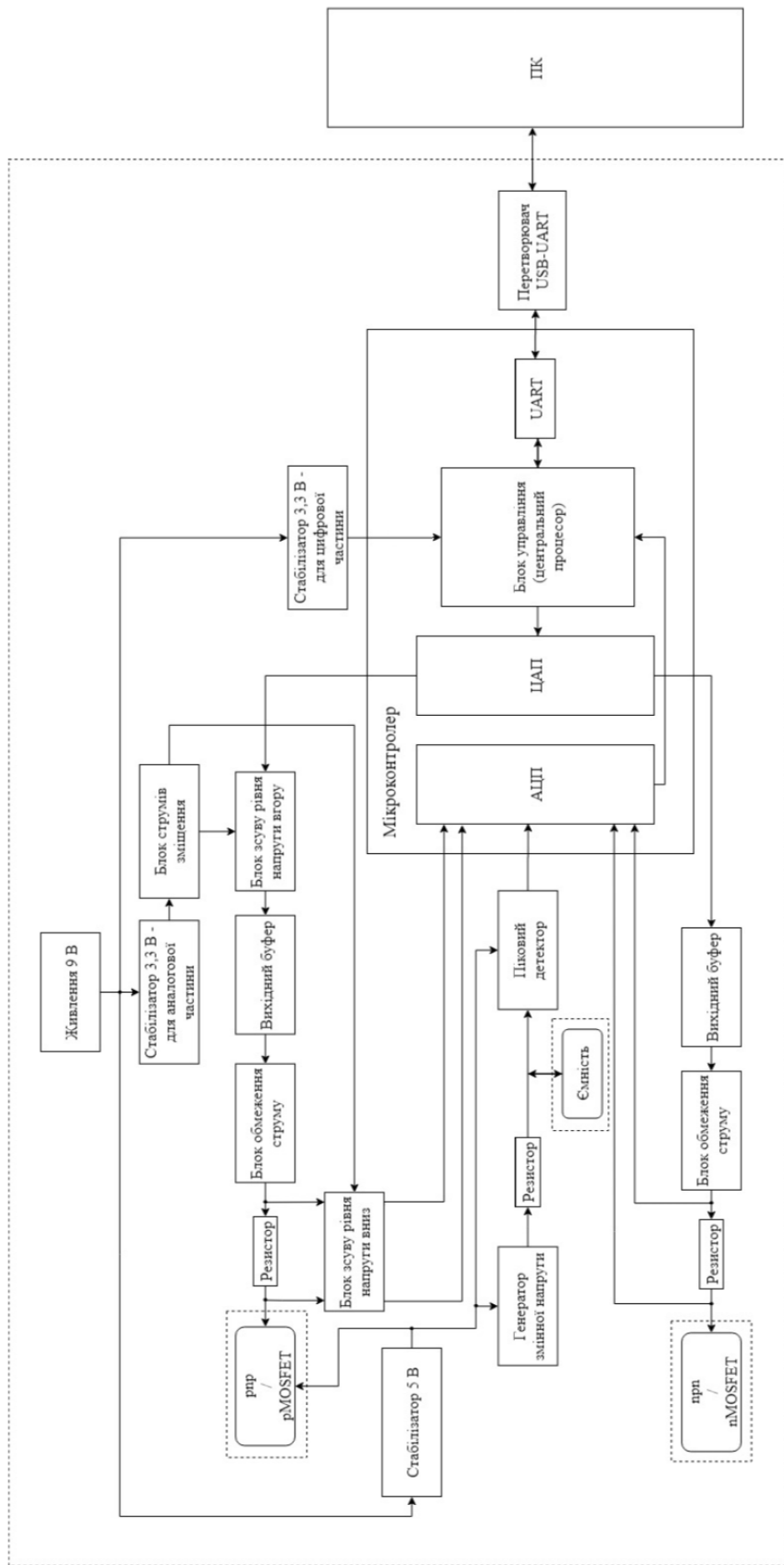


Рисунок 1.11. Структурна схема тестеру транзисторів на AVR-мікроконтролері

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ

- Контроль силових параметрів: Завдяки вбудованим засобам обмеження струму та зсуву напруги, мікроконтролер координує роботу блоку обмеження вихідного струму і блоку зсуву напруги. Це дозволяє забезпечити коректну експлуатацію як pnp, так і npn (а також р-канальних) транзисторів, не порушуючи заданих умов вимірювання та захищаючи пристрій від перенапружених чи перенапружених режимів роботи.

Застосування мікроконтролера як центрального блоку управління має кілька суттєвих переваг:

- Компактність і надійність: Забезпечення всієї необхідної периферії в одному кристалі зменшує схему друкованої плати та потенційні точки відмови;
- Швидкість і точність: Реалізація алгоритмів обробки даних безпосередньо всередині мікроконтролера дозволяє швидко та точно виконувати вимірювання, що є критичним для формування коректних ВАХ та екстракції параметрів;
- Гнучка інтеграція з ПК: Стандартний інтерфейс UART дозволяє легко налагодити двосторонній обмін даними між тестером і комп'ютером, що забезпечує можливість адаптувати програмне забезпечення під конкретні задачі та розширювати функціональні можливості пристрою.

### 1.3.9 Структурна схема тестеру транзисторів на AVR-мікроконтролері

На основі описаних вище принципів роботи тестера, розроблено структурну схему вимірювача параметрів транзисторів, представлену на рисунку 1.11. У цій схемі окремо виділено інтегрований блок вимірювання, який обведено штрихованою лінією; решта компонентів – живлення, блоки формування напруги, вимірювання струму, ємності, а також інтерфейс зв'язку з ПК – підключаються ззовні. Для спрощення подання на схемі не наведено зображення всіх виводів транзисторів та численних вузлів, до яких вони підключаються. Основні структурні підсистеми включають:

- Блок формування напруги, який за допомогою ЦАП разом з блоком зсуву напруги генерує необхідні вхідні сигнали для тестування транзисторів;

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

- Блок вимірювання струму та ємності, що використовує резистори-шунти, пікові детектори та АЦП для точного зчитування характеристик, з подальшою обробкою даних;
- Блок управління, що реалізовано на базі мікроконтролера ATmega328, який координує роботу всіх вимірювальних підсистем, здійснює первинну обробку даних та забезпечує передачу результатів до ПК;
- Блок обмеження вихідного струму та зсуву напруги, який гарантує захист досліджуваного пристрою та забезпечує коректну роботу при різних режимах вимірювань.

Взаємодія цих підсистем здійснюється за допомогою загального блоку управління, що синхронізує процес збору даних та забезпечує їх коректне відображення на графічному дисплеї і передачу до комп'ютера. Рис. 1.11 ілюструє загальну архітектуру тестера: внутрішній вимірювальний модуль (обведений штриховою лінією) чітко виділяється серед зовнішніх компонентів, що підключаються до нього. Повний опис функціональних взаємозв'язків складових елементів наведено в попередніх підрозділах.

#### 1.4 Модернізація принципової електричної схеми тестеру

Основою модернізації є базова схема, запропонована Markus Frejek у проєкті AVR Transistortester (Embedded Projects Journal, 11. Ausgabe, 2011). У новій схемі, представлений на рис. 1.12, усі змінені або переміщені елементи позначено зеленим кольором, а додаткові – червоним, що дозволяє легко відстежувати й інтегрувати зміни.

Одним із ключових удосконалень є модернізація електронного вимикача живлення. У попередніх реалізаціях виникали труднощі з його роботою, тому резистор R7 було зменшено до 3,3 кОм, а конденсатор C2 – до 10 нФ. Крім того, переміщення резистора R8 дозволило підключити вивід порту PD6 через конденсатор C2 замість прямого з'єднання, що сприяє кращому фільтруванню сигналів і стабільності роботи ланцюга. Додатково в схемі запроваджено встановлення блокувальних конденсаторів біля виводів живлення

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
						37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мікроконтролера ATmega та стабілізатора напруги. Ці заходи дозволяють мінімізувати шуми та забезпечують більш стабільну роботу всієї схеми. Для посилення контролю на виводі PD7 (вивід 13 ATmega) додано додатковий підтягуючий резистор на 27 кОм. Варто зауважити, що в даній модифікації програмне забезпечення свідомо відключає всі внутрішні підтягуючі резистори мікроконтролера, що сприяє більш точному зовнішньому налаштуванню.

Ще одним важливим удосконаленням є впровадження додаткового кварца на 8 МГц поряд із конденсаторами C11 та C12 (номіналом 22 пФ кожен). Підвищена точність кварца дозволяє досягти більш точного вимірювання часу, що є необхідним для визначення ємності конденсаторів тестеру.

Нова версія програмного забезпечення забезпечує можливість перемикання масштабу напруги АЦП. Однак швидкість цього перемикання значною мірою залежить від параметрів зовнішнього конденсатора C1 на виводі AREF (вивід 21 ATmega). Для усунення небажаного уповільнення процесу масштабу ємність C1 зменшено до 1 нФ; в окремих випадках використання цього конденсатора може бути навіть відсутнім, що спрощує конфігурацію ланцюга.

Адаптацію програмного забезпечення до конкретної реалізації схеми забезпечує файл makefile. Зокрема, співвідношення резисторів R11/R12 визначає величину контрольної напруги для моніторингу розряду батареї. У цій модифікації програмне забезпечення адаптовано до значень 10 кОм і 3,3 кОм, при цьому значення опорних резисторів у дільнику напруги можуть бути додатково налаштовані через makefile.

Також реалізовано подачу додаткової опорної напруги у розмірі 2,5 В на вивід PC4 (ADC4), що дозволяє проводити калібрування тестеру відносно напруги живлення VCC. Для цього можуть використовуватися стабілізовані джерела напруги, зокрема, такі як LM4040-AIZ2.5 (точність 0,1%), LT1004CZ 2.5 або LM336-Z2.5 (точність 0,8%). Якщо ж стабілізований опорний елемент не встановлено або не передбачена захист за допомогою реле, необхідно встановити високономінальний підтягуючий резистор R16 (47 кОм) до PC4. Це дозволяє програмному забезпеченню виявити відсутність опорного джерела.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38



Останнім удосконаленням є додавання додаткового інтерфейсу ISP. Він полегшує завантаження нових версій програмного забезпечення, роблячи процес програмування мікроконтролера більш ефективним і зручним.

Таким чином, модернізація принципової електричної схеми тестеру транзисторів спрямована на покращення точності вимірювань, забезпечення стабільності роботи елементів живлення та спрощення процесу оновлення програмного забезпечення. Інтеграція апаратних змін із гнучкими налаштуваннями через makefile дозволяє адаптувати тестер до різноманітних умов експлуатації та вимог користувача, що значно підвищує його функціональність і надійність.

### 1.4.1 Захист портів АТmega

Для забезпечення надійного захисту портів мікроконтролера АТmega в тестері транзисторів застосовано один із двох варіантів схеми, зображених на рисунку 1.13.

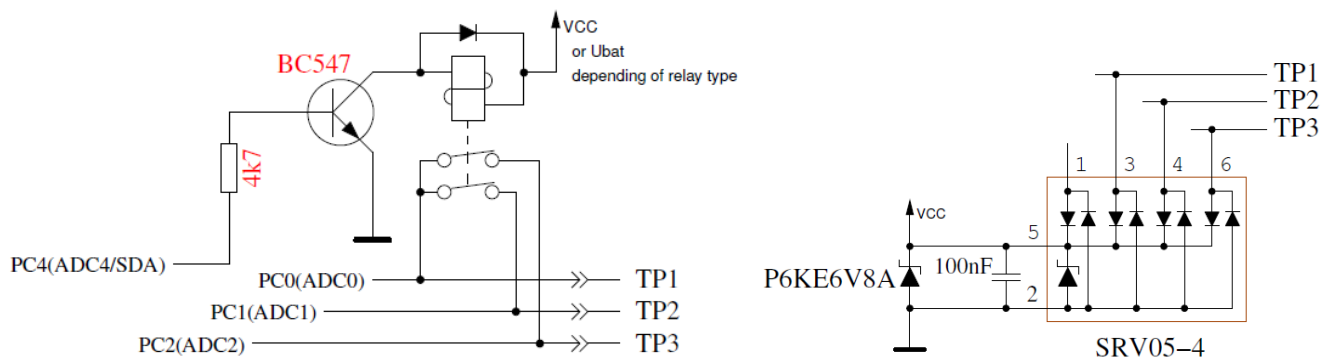


Рисунок 1.13. Схема захисту портів АТmega із використанням реле (ліворуч) та із використанням діодів (праворуч)

У першому варіанті (зображеному ліворуч) захист реалізовано за допомогою реле. Коли напруга живлення відсутня, контакти реле автоматично переходять у розімкнений стан, що ізолює АТmega від зовнішніх впливів, які можуть виникнути, наприклад, при підключенні конденсатора з залишковим зарядом. Початково контакти перебувають у ізольованому стані, а при старті вимірювання програмне забезпечення оперативно розмикає їх, що дозволяє уникнути небажаних впливів на чутливі входи мікроконтролера.

Альтернативним рішенням є застосування діодів для захисту портів

(зображено на схемі праворуч). Цей метод знижує ризик пошкодження через ненавмисне підключення конденсатора з залишковою напругою. Діоди перешкоджають протіканню струму в небажаному напрямку, завдяки чому відбувається автоматичне «перетворення» потенційно шкідливого впливу у безпечний режим роботи. Однак, хоча цей підхід допомагає запобігти більшості аварійних ситуацій, він не гарантує повну відсутність ризику, якщо конденсатор не буде належним чином розряджений.

Незалежно від обраного варіанту захисту, жодна з представлених схем не забезпечує абсолютного захисту АТmega від залишкового заряду конденсаторів. Тому перед здійсненням вимірювань слід завжди попередньо розрядити конденсатор, що є критичним заходом для уникнення пошкоджень мікроконтролера.

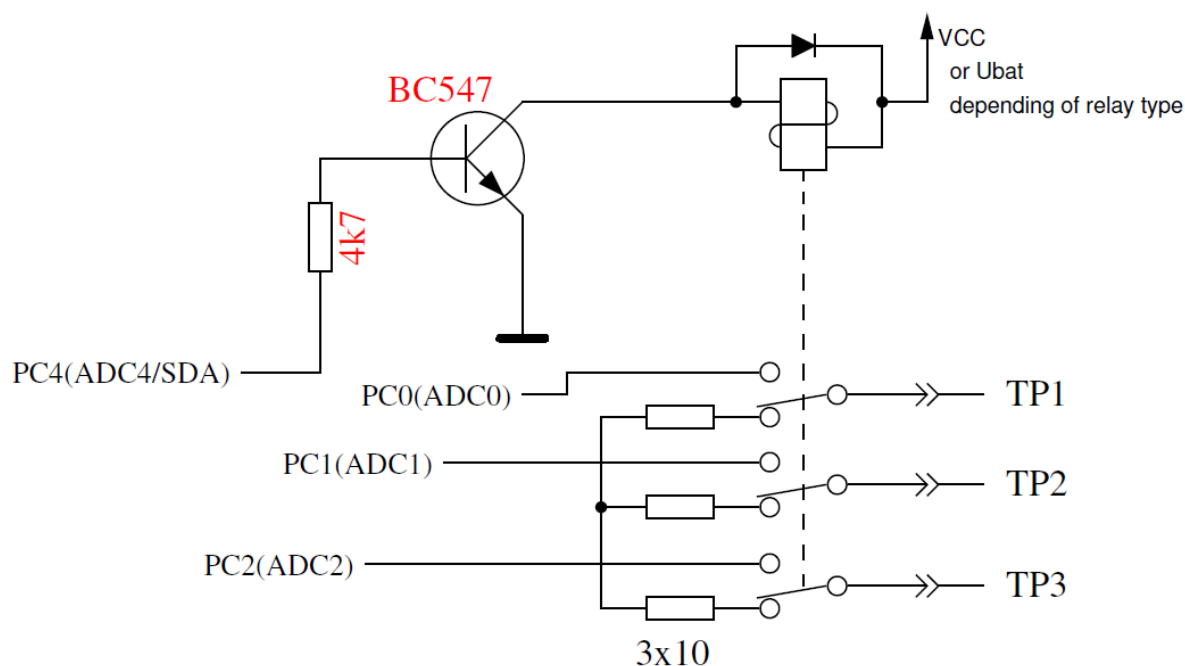


Рисунок 1.14. Схема захисту портів АТmega із використанням реле з трьома групами контактів

Для додаткового підвищення рівня безпеки можна використовувати реле з трьома групами контактів, як показано на рис. 1.14. У цьому випадку розрядний струм обмежується за допомогою резисторів, а входи АТmega автоматично відключаються у захисному режимі. Варто зазначити, що у режимі послідовних (циклічних) вимірювань тестер працює без додаткового захисту, тому необхідно дотримуватись додаткових заходів обережності.

### 1.4.2 Використання поворотного енкодера

Для більш зручного доступу до меню додаткових функцій на основі ATmega328 можна доповнити схему встановленням інкрементального (поворотного) енкодера з кнопкою. На рис. 1.15 показано схему підключення енкодера до тестера з символьним LCD, де всі сигнали для його роботи доступні через роз'єм, який зазвичай використовується для підключення LCD. Це дозволяє провести модернізацію практично більшості існуючих тестерів, адже навіть у випадку, коли використовується графічний LCD, який збирається на перехідній платі, контакти, призначені для символьного дисплею, доступні для підключення енкодера.

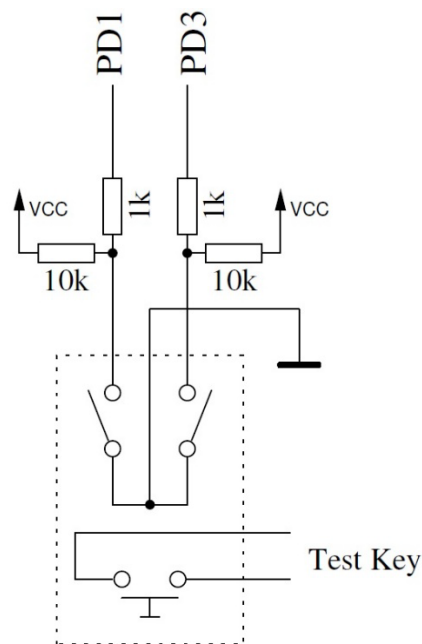


Рисунок 1.15. Схема підключення поворотного енкодера

На рисунку 1.16 продемонстровано особливості роботи двох типів поворотних інкрементальних енкодерів:

- Версія 1. Повна послідовність станів перемикачів відбувається при повороті на два фіксовані положення. Відповідно, кількість повних циклів буде вдвічі меншою від кількості фіксованих положень за один поворот;
- Версія 2. При повороті на одне фіксоване положення генерується повний цикл станів контактів, тобто кількість фіксованих положень відповідає кількості циклів за оберт. В окремих моделях енкодерів у кожному фіксованому положенні стан контактів залишається незмінним.

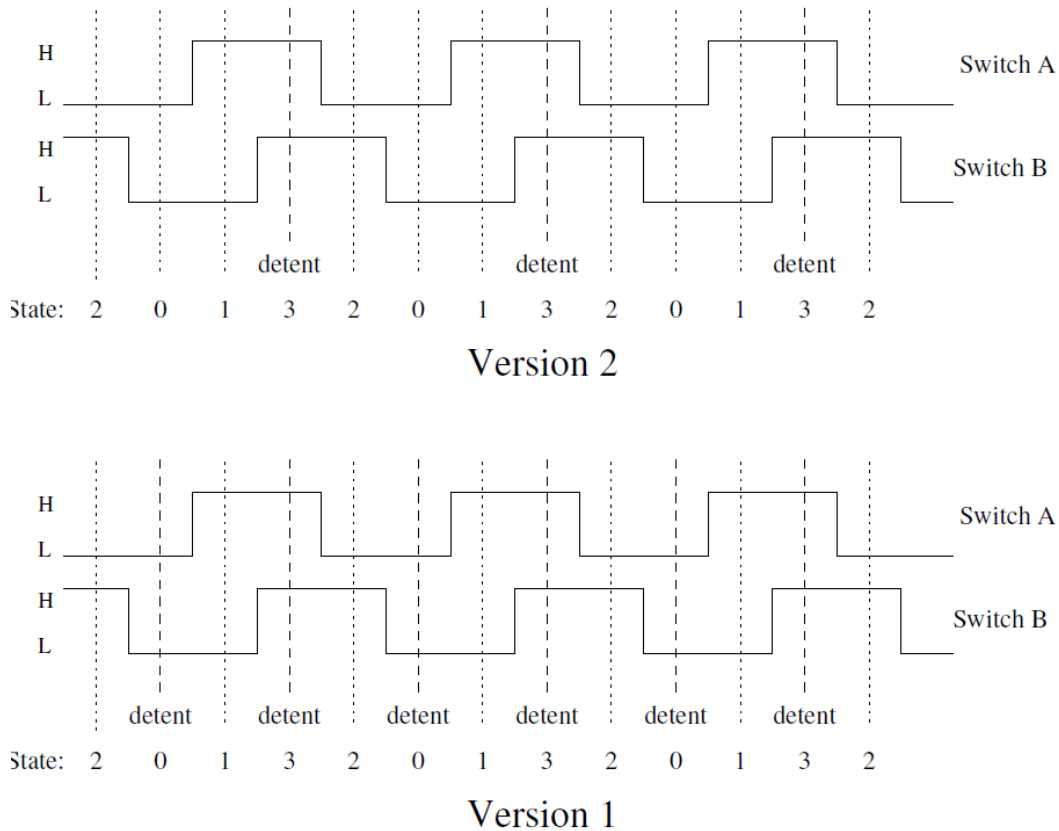


Рисунок 1.16. Особливості двох типів поворотних інкрементальних еncoderів

Рис. 1.17 ілюструє роботу еncoderа, який крім характерного «брякоту» контактів демонструє й нестабільне становище перемикача в точці фіксації. Програма кожної зміни стану вимірює контакти еncoderа та зберігає їх у циклічний буфер, що дозволяє аналізувати останні три стани після кожного переходу. Таким чином, для кожного циклу перемикачання може бути визначено до чотирьох можливих послідовностей для кожного напрямку обертання.

Якщо для однієї фіксованої позиції здійснюється один повний цикл зміни станів, для коректного підрахунку достатньо контролювати взаємодію перемикача в одному каналі (опції `WITH_ROTARY_SWITCH = 2` або `3`). Натомість, якщо утворення повного циклу вашого еncoderа вимагає обертання на два фіксовані положення (як показано на рис. 1.17), необхідно контролювати послідовність сигналів в обох каналах (`WITH_ROTARY_SWITCH = 1`).

Для еncoderів, які не мають фіксації, допускається вибір довільної чутливості до кута обертання. Зазвичай значення 2 та 3 означають низьку чутливість, значення 1 – середню, а значення 5 – високу чутливість. Підрахунок

імпульсів, що визначають кількість рухів «вгору» та «вниз», може реалізовуватись за допомогою спеціального алгоритму. Проте варто враховувати, що через нестабільність контактів у точці фіксації певні імпульси можуть бути втрачено.

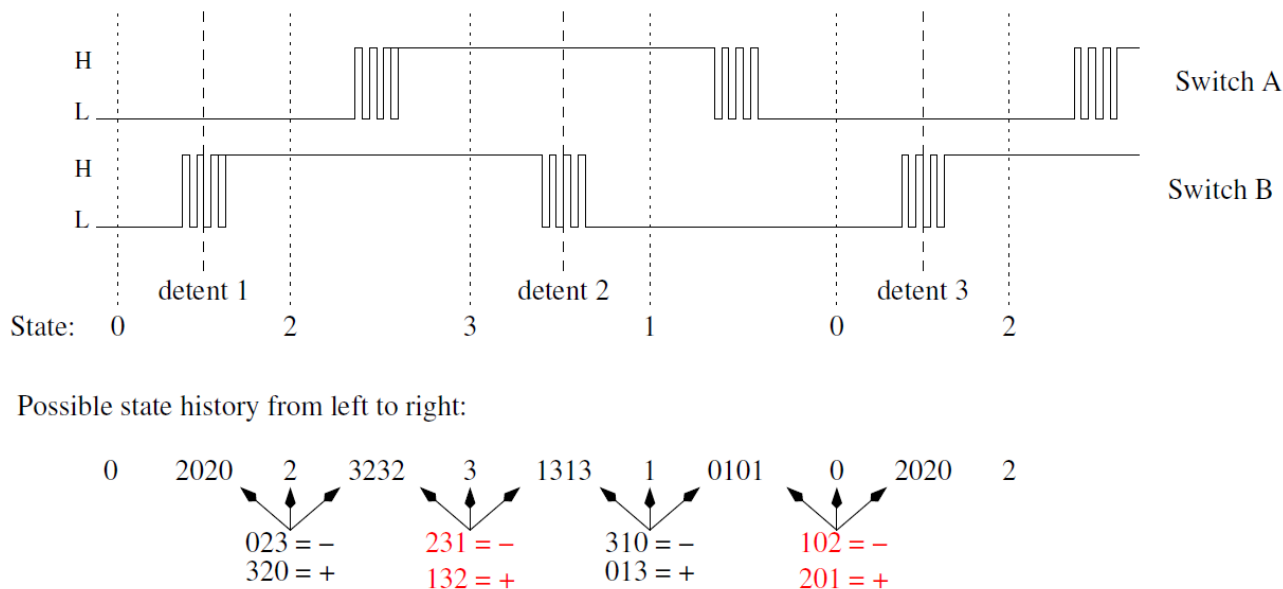


Рисунок 1.17. Енкодер з брязкотом контактів перемикачів

Якщо з якихось причин використання поворотного енкодера є недоцільним (наприклад, через конструктивні обмеження), замість нього можна застосувати дві окремі кнопки для переміщення вгору та вниз. У такому випадку для правильної роботи програми значення опції `WITH_ROTARY_SWITCH` слід встановити на 4.

Таким чином, використання поворотного енкодера з кнопкою забезпечує зручний та інтуїтивно зрозумілий доступ до меню додаткових функцій. Це розширення значною мірою спрощує інтерфейс тестера і дозволяє адаптувати існуючі пристрої до нових можливостей, незалежно від типу дисплея, що використовується.

### 1.4.3 Підключення графічного кольорового дисплея

На рис. 1.18 представлено задній вигляд двох підтримуваних кольорових дисплеїв з роздільною здатністю 128×128 та 128×160 пікселів. Завдяки мінімальному розміру модулів текст і символи відображаються досить дрібно, але зовнішній вигляд залишається чітким та ясним.

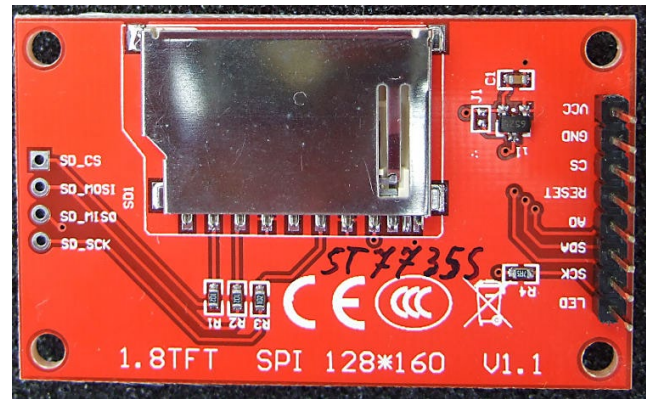


Рисунок 1.18. Підключення модулів кольорових дисплеїв двох типів

Модуль з роздільною здатністю 128×128 пікселів використовує контролер ІЛІ9163, а модуль 128×160 – контролер, дуже близький до ST7735. Обидва модулі тестувалися з використанням адаптерної плати, яка забезпечує зручне з'єднання сигналів SPI та живлення, що сприяє коректному відображенню символів.

Для безпечної адаптації вихідних рівнів АТmega (5 В) до рівня сигналів контролера (3,3 В) використовується послідовне підключення 10 кΩ резисторів. Це дозволяє запобігти невідповідності логічних рівнів і забезпечити надійну роботу пристрою. Обов'язковим елементом є підсвічування (LED), оскільки завдяки йому навіть при малих розмірах тексту інформацію можна легко прочитати.

Завдяки високій вертикальній роздільній здатності дисплеїв можливо відобразити декілька текстових рядків:

- Для дисплея з 128×128 пікселів – до 8 рядків тексту шрифтом розміром 12×8;
- Для дисплея з 128×160 пікселів – до 10 рядків тексту.

На рис. 1.19 можна побачити приклад відображення результату вимірювання германієвого PNP транзистора на дисплеї 128×128 пікселів, що демонструє високу якість відтворення деталей.

Хоча можливості кольоровості цих модулів наразі не використовуються, колір фону та відображуваних елементів можна легко налаштувати. Для цього потрібно відредагувати параметри у файлі lcd\_defines.h або змінити відповідні налаштування в Makefile. Програмне 16-бітне керування кольоровою палітрою

дозволяє змінювати колір тексту за допомогою параметра LCD\_FG\_COLOR та колір підсвічування за допомогою параметра LCD\_BG\_COLOR.

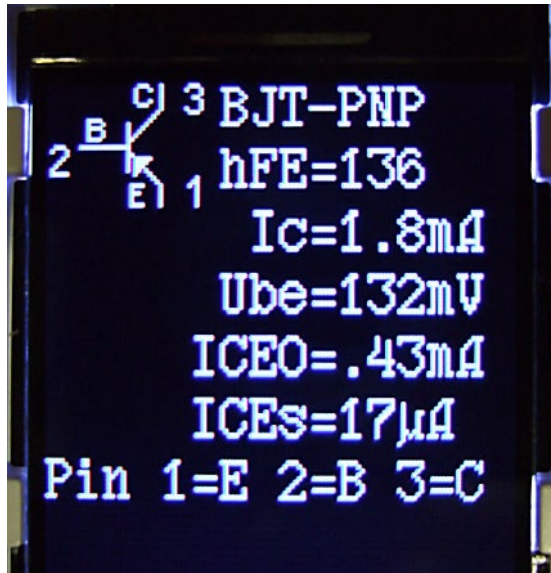


Рисунок 1.19. Тестування біполярного р-п-р транзистора

Таким чином, інтеграція графічного кольорового дисплея значно розширює функціональні можливості тестера, дозволяючи користувачу отримувати детальну інформацію у зручному та адаптованому вигляді.

### 1.5 Розробка блок-схем тестування транзисторів за допомогою модернізованого тестеру

Цей розділ присвячено розробці алгоритмів і блок-схем, що лежать в основі вимірювань та аналізу характеристик транзисторів (як кремнієвих, так і германієвих) за допомогою модернізованого тестеру. Система забезпечує автоматизований процес ідентифікації типу транзистора, визначення коефіцієнта посилення, порогових напруг і інших важливих параметрів, що дозволяє отримати повну картину його поведінки в електричному колі.

Вимірювання транзисторів NPN і PNP:

1. Початкове підключення та запуск вимірювання: Три виводи транзистора підключаються до тестових входів пристрою у довільному порядку. Після натискання кнопки TEST тестер починає послідовність вимірювань. У першому рядку дисплея відображається тип транзистора (NPN або PNP), символ вбудованого (захисного) діода колектор-емітер (якщо він присутній) із

правильною полярністю, а також послідовність підключених виводів.

2. Основні параметри та методи вимірювання: Підрахунок коефіцієнта посилення ( $\beta$  або  $h_{FE}$ ): У другому рядку виводиться значення коефіцієнта посилення разом із струмом, при якому воно було визначене. При використанні схеми з загальним емітером тестер вимірює колекторний струм ( $I_C$ ). При схемі із загальним колектором відображається струм емітера ( $I_E$ ). Якщо дисплей має лише два рядки, інформація виводиться один за одним: після завершення відображення першої групи параметрів (тип, порядок виводів, характеристика діода) – друкується коефіцієнт посилення разом із відповідним значенням струму. При наявності додаткових параметрів (поріг база-емітер, зворотний струм колектора, напруга падіння на захисному діоді) вони послідовно виводяться на наступних екранах або через певний інтервал часу з можливістю переключення шляхом повторного натискання кнопки TEST. Якщо інформації більше, ніж рядків дисплея вистачає, у нижньому рядку з'являється символ «+», що сигналізує про наявність додаткових даних.

3. Показ додаткових параметрів: Порогова напруга база-емітер ( $U_f$ ): Вимірюється паралельно з іншими параметрами. Якщо в тестері передбачено можливість вимірювання зворотного струму колектора при: Розімкненій базі ( $I_{CE0}$ ); Замкнених виводах бази і емітера ( $I_{CES}$ ), то ці значення також виводяться на дисплеї. При встановленому захисному діоді останнім параметром відображається падіння напруги ( $U_f$ ) на ньому.

Схема тестування за допомогою загального емітеру передбачає два основні режими задання базового струму:

- Варіант з резистором 680  $\Omega$ : Параметри: Базовий струм лімітується приблизно до 6,1 мА. Особливості: Цей струм може бути занадто великим для малопотужних транзисторів із високим коефіцієнтом  $\beta$ , оскільки база швидко насичується, що призводить до неможливості досягнення колекторним струмом повного потенціалу  $\beta$ ;
- Варіант з резистором 470 к $\Omega$ : Параметри: Базовий струм обмежується приблизно до 9,2  $\mu$ А. Особливості: За такої схеми програмне

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

забезпечення проводить розрахунок коефіцієнта  $\beta$  на основі отриманих параметрів (значення  $h_{FE}$ ).

Додатково, тестер вимірює  $\beta$  за схемою з загальним колектором і на дисплеї виводить максимальне значення із двох методів. Схема із загальним колектором має перевагу, оскільки завдяки негативному зворотному зв'язку базовий струм знижується, що дозволяє досягти більш точних вимірювань для потужних транзисторів (з резистором на  $680 \Omega$ ) та для транзисторів Дарлінгтона (з резистором на  $470 \text{ к}\Omega$ ).

Якщо виникає потреба у визначенні порогової напруги база-емітер при струмі вимірювання близько  $6 \text{ мА}$ , рекомендується відключити колектор і провести окреме вимірювання. У цьому режимі дисплей покаже порогову напругу для зазначеного струму, а також – ємність переходу у зворотному включенні, що дозволяє проаналізувати поведінку як база-емітерного, так і база-колекторного діоду.

Для германієвих транзисторів тестер здійснює вимірювання зворотного струму колектора при відкритій базі ( $I_{CE0}$ ) та при короткозамкнених виводах бази та емітера ( $I_{CES}$ ). Відображення: Зворотній струм колектора виводиться у другому рядку індикатора протягом 5 секунд або до наступного натискання кнопки TEST (цей режим реалізовано для ATmega328). Особливості при охолодженні: При охолодженні германієвого транзистора зворотній струм може знижуватися, що відображається у відповідних показниках тестера.

Вимірювання JFET та транзисторів D-MOS (рис. 1.20):

Завдяки симетричній будові JFET неможливо однозначно визначити, який вивід є джерелом, а який стоком. Найчастіше аналізується струм транзистора з затвором, який зазвичай знаходиться на тому ж рівні, що і джерело (зазвичай затвор з'єднується з джерелом). Оскільки струм може перевищувати можливості вимірювання в схемі з резистором  $680 \Omega$ , цей резистор підключається до джерела. Зі збільшенням струму джерела формується негативне зміщення на затворі, що дозволяє тестеру відображати як значення струму, так і напругу зміщення затвору.

Для транзисторів D-MOS застосовується той самий метод вимірювання.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

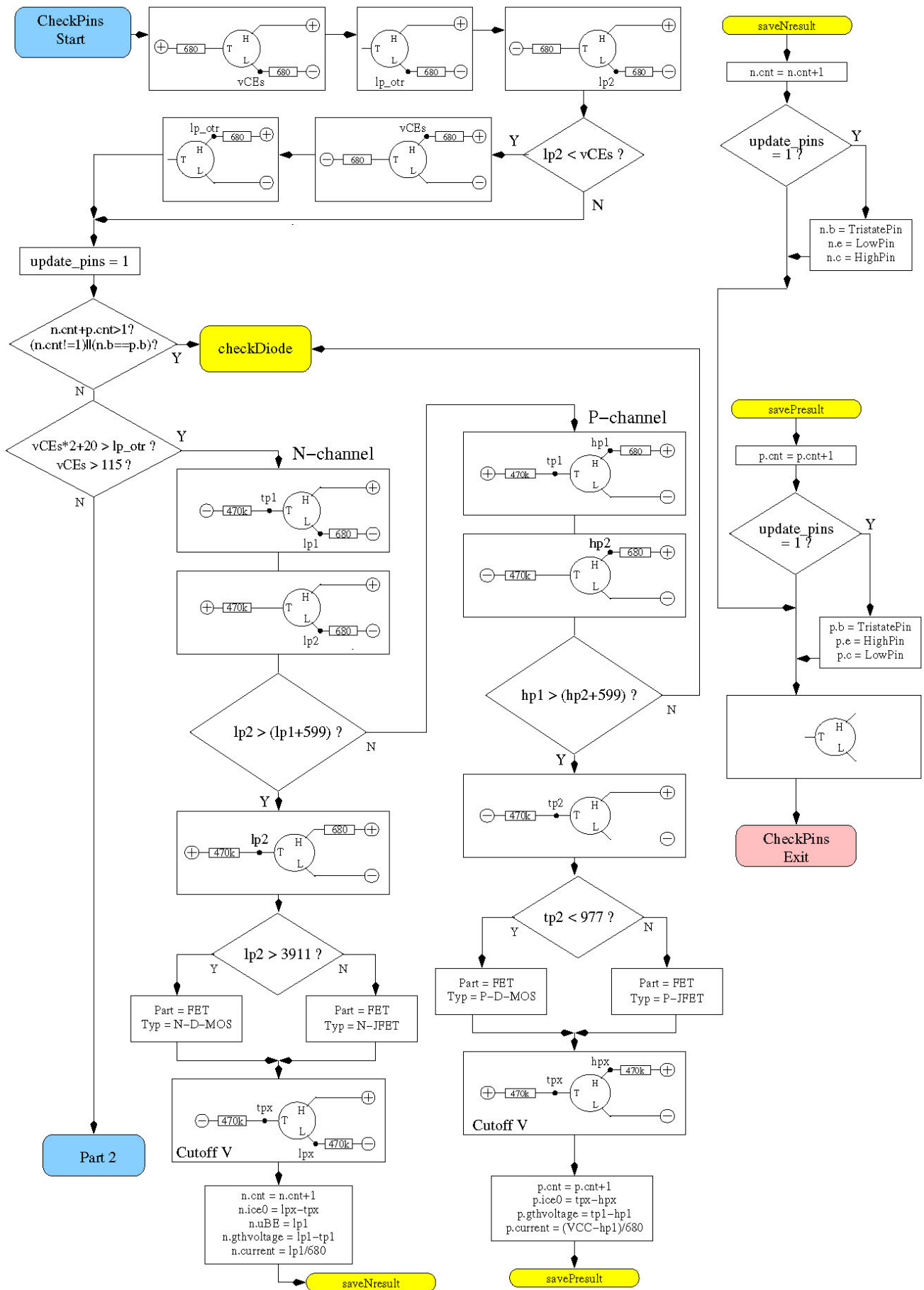


Рисунок 1.20. Блок-схема алгоритму тестування транзисторів JFET і D-MOS

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ

Арк.

49

Вимірювання E-MOS транзисторів та IGBT (рис.1.21):

Для транзисторів з елементами збагачення (P-E-MOS або N-E-MOS), де  $\epsilon$  мінімальна ємність затвору, вимірювання порогової напруги затвору ( $V_{th}$ ) є складнішим. Коректність вимірювання покращується шляхом паралельного підключення конденсатора на кілька нФ між затвором та джерелом. У такому режимі порогова напруга визначається при струмах приблизно 3,5 мА для P-E-MOS та 4 мА для N-E-MOS. Крім того, вимірюється  $R_{DS}$  при напрузі на затворі близько 5 В, що може не відповідати мініимальному можливому значенню через обмеження низького струму стоку.

IGBT та вдосконалені МОП-транзистори:

У деяких випадках напруга 5 В, що подається тестером, є недостатньою для повноцінного керування транзистором через затвор. Для забезпечення коректного виявлення та вимірювання може бути використана додаткова батарея (близько 3 В). Один полюс батареї підключається до затвору транзистора, а інший – до тестового порту (TP) замість безпосереднього підключення до затвору.

При правильній полярності батарея додає свою напругу до управляючої напруги тестера, що підвищує ймовірність виявлення транзистора. Отриманий показник порогової напруги затвору коригується шляхом додавання напруги батареї для отримання остаточного правильного значення.

Розробка блок-схем тестування транзисторів за допомогою модернізованого тестеру передбачає комбінацію декількох методів вимірювання та аналізу:

- Автоматичну ідентифікацію типу транзистора та визначення послідовності його виводів;
- Використання різних схем для вимірювання коефіцієнта посилення ( $\beta/h_{FE}$ ) із застосуванням режимів з загальним еміттером та загальним колектором;
- Гнучке відображення інформації на дисплеї, яке адаптується під кількість доступних рядків;
- Розширення функціоналу для вимірювання додаткових характеристик: порогової напруги, зворотних струмів, ємностей переходів, а також аналізу специфічних типів (германієвих, JFET, D-MOS, E-MOS, IGBT).

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50



### 1.5.1 Алгоритм вимірювання напівпровідникових елементів

Дослідження елемента слід розпочинати з відключеним управляючим виводом – так званим TriStatePin (третій вивід). Під час випробувань TriStatePin виконує роль базового або відправного виводу, що дозволяє контролювати стан напівпровідникового пристрою. Один із випробувальних виводів обрано як позитивну сторону елемента і підключено безпосередньо до VCC, а інший – як негативну сторону, яка через резистор 680  $\Omega$  підключається до GND.

Початковий етап вимірювання:

1. Підключення TriStatePin до GND: Спочатку TriStatePin протягом 5 мс підключається через резистор 680  $\Omega$  до GND. В цей момент вимірюється напруга на негативній стороні випробувального виводу.

2. Перемикання TriStatePin в режим вводу: Після першого вимірювання TriStatePin перемикається в режим Ввід (високий вхідний опір). Знову здійснюється вимірювання напруги на негативному випробувальному виводі. Це дозволяє отримати інформацію про потенційну зміну внутрішніх характеристик елемента при відключеному управляючому контакті.

3. Підключення TriStatePin до VCC: Наступним кроком передбачуваний затвор підключається через резистор 680  $\Omega$  до VCC на 5 мс. Після цього знову вимірюється напруга на негативній стороні. Якщо отримане значення напруги нижче, ніж при першому вимірюванні (коли TriStatePin був підключений до GND), така схема вважається правильною для подальшого аналізу.

4. Фінальне вимірювання з обесточеним TriStatePin: Після зміни станів TriStatePin напруга на негативному випробувальному виводі вимірюється знову, коли управляючий вивід перебуває в знеструмленому стані.

Інтерпретація результатів і визначення типу елемента:

- Обіднений транзистор: Якщо напруга на негативному випробувальному виводі при фіксованому (стабільному) TriStatePin перевищує 115 мВ, а при знеструмленому TriStatePin не опускається нижче 100 мВ, то передбачається, що елемент є обідненим транзистором. У випадку біполярних транзисторів із підвищеним зворотним током колектора, цей

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

показник суттєво зростає в режимі з знеструмленою базою. Перевірка обома режимами дозволяє уникнути помилкового визначення деяких германієвих транзисторів, з високим зворотним током колектора, як об'єднаних (JFET);

- Визначення видів FET: Після початкової перевірки проводяться додаткові тести з ідентифікації N-канальних JFET або N-DMOSFET та P-канальних JFET або P-DMOSFET. Для MOSFET важлива відсутність струму на затворі при будь-якому стані TriStatePin – цей критерій дозволяє відокремити їх від інших типів елементів.

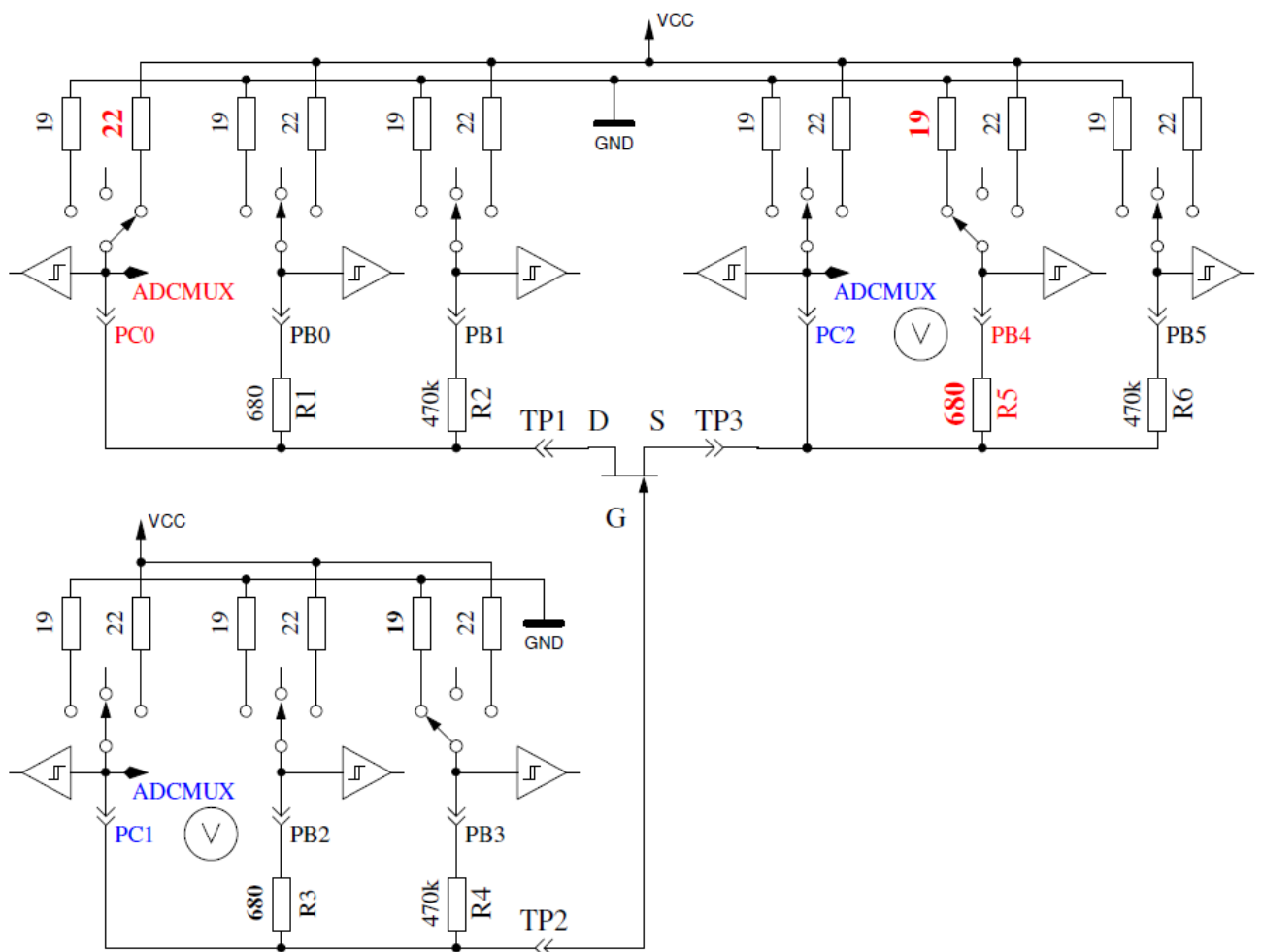


Рисунок 1.22. Вимірювання напруги затвор-витік і струму витіку N-JFET

Вимірювання характеристик FET об'єднаного типу:

Щоб отримати параметри FET елементів об'єднаного типу, вимірювання проводиться із використанням резистора 680  $\Omega$  в джерелі (витіку), як показано на відповідній схемі (рис. 1.22). Цей метод використовується замість звичайного вимірювання струму утримування затвору на рівні джерела, оскільки струм  $I_{DSS}$

часто не може бути досягнутий через відносно високе опірність резистора.

Якщо між позитивним і негативним випробувальними виводами елемент не пропускає струм при відсутності сигналу на TriStatePin, тоді перехід здійснюється до наступних тестів, описаних у подальших розділах, для детальнішого визначення характеристик напівпровідникового елементу.

Таким чином, алгоритм вимірювання напівпровідникових елементів забезпечує послідовний аналіз стану елементу за допомогою послідовних модифікацій стану TriStatePin, що дозволяє точно ідентифікувати тип структури, визначити властивості переходів, а також уникнути помилкової інтерпретації зворотних струмів, що особливо важливо при вимірюванні як JFET, так і інших видів транзисторів.

### 1.5.2 Алгоритм вимірювання P-N-P транзистора або P-Channel-MOSFET

Спочатку проводиться визначення коефіцієнта посилення передбачуваного P-N-P транзистора в схемі із загальним колектором (емітерний повторювач), як показано на рис. 1.23. За цим методом базовий струм задається через резистор 680 Ω. Якщо напруга на базі ( $U_B$ ), виміряна з використанням резистора 680 Ω, перевищує 9 мВ, коефіцієнт посилення обчислюється за формулою:

$$h_{FE} = \frac{U_E - U_B}{U_B} \quad (1.12)$$

де  $U_E$  – це різниця між напругою на емітері та VCC. При цьому не враховується різниця між резисторами з номіналами 22 Ω та 19 Ω.

Якщо ж виміряне значення  $U_B$  менше 10 мВ, вимірювання проводять із заміною резистора в базі на 470 kΩ. У цьому випадку коефіцієнт посилення обчислюється за формулою:

$$h_{FE} = \frac{U_E \times 470,000}{U_B \times (680 + 22)} \quad (1.13)$$

Після цього проводяться додаткові тести для перевірки елементу в схемі з загальним емітером, де позитивна сторона елемента безпосередньо підключена до VCC, а негативна – через резистор 680 Ω до GND (рис. 1.24). Якщо на негативній

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

стороні елемента спостерігається напруга вище 3,4 В при підключеному базовому резисторі 680 Ω до GND, це свідчить про те, що елемент є або Р-N-Р транзистором, або Р-каналним FET. Далі визначення типу проводиться шляхом аналізу напруги на базі:

- Якщо напруга на базі перевищує 0,97 В, то елемент ідентифікується як Р-N-Р транзистор;
- Якщо  $U_B$  менше 0,97 В, мова йде про Р-Е-MOS транзистор.

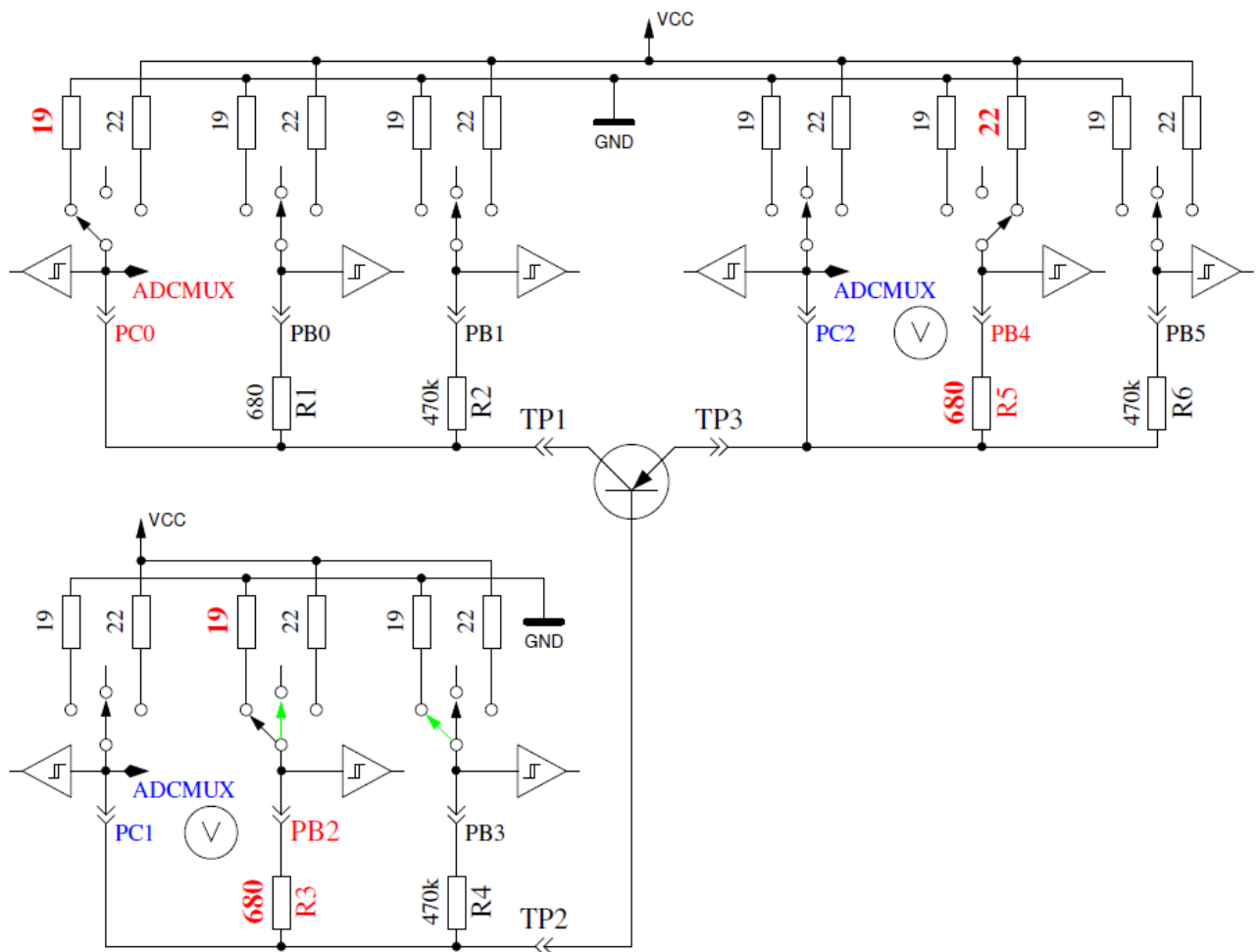


Рисунок 1.23. Вимірювання  $h_{FE}$  Р-N-Р транзистора у схемі з спільним колектором

Для вимірювання коефіцієнта посилення в режимі загального емітера, у ланцюг бази замість резистора 680 Ω підключається резистор 470 kΩ. У цьому випадку коефіцієнт посилення розраховується за формулою:

$$h_{FE} = \frac{(U_C - U_{C0}) \times 470,000}{U_B \times (680 + 19)} \quad (1.14)$$

де  $U_C$  – напруга на колекторі при навантаженні, а  $U_{C0}$  – напруга на



Таким чином, алгоритм вимірювання Р-N-P транзисторів або Р-Channel-MOSFET включає два основних підходи для розрахунку коефіцієнта посилення – через схему з загальним колектором та, у випадку Р-N-P транзисторів, через схему з загальним емітером. Порівняння отриманих значень дозволяє визначити правильний режим роботи і ідентифікувати тип напівпровідникового елемента.

### 1.5.3 Алгоритм вимірювання N-P-N транзистора або N-Channel-MOSFET

Алгоритм вимірювання елементів типу N-P-N (або N-Channel MOSFET) починається аналогічно до процедури для Р-N-P – із визначення коефіцієнта посилення в схемі з загальним колектором. Спочатку в ланцюзі бази використовується резистор 680 Ω, який підключений до VCC. Якщо при цьому напруга на резисторі в базовому ланцюгу виявляється занадто низькою, замість резистора 680 Ω використовується резистор 470 kΩ для забезпечення вимірювань при нижчому струмі. Після цього вимірювання переходить до схеми з загальним емітером, як це показано на рис. 1.25.

Якщо у схемі з загальним емітером напруга на колекторі виявляється нижчою за 1,6 В при застосуванні резистора 680 Ω у базовому ланцюгу (тобто базове з'єднання залишається підключеним до VCC), елемент може бути або N-P-N транзистором, або N-канальним MOSFET.

Для N-P-N транзистора базове напруження буде майже рівним напрузі на емітері, що дозволяє однозначно ідентифікувати цей тип елемента. У схемі з загальним емітером коефіцієнт посилення ( $h_{FE}$ ) розраховується за формулою:

$$h_{FE} = \frac{(V_{CC} - U_C - U_{C0}) \times 470,000}{(V_{CC} - U_B) \times (680 + 22)} \quad (1.15)$$

де:

- $U_C$  – напруга на колекторі при навантаженні;
- $U_{C0}$  – напруга на колекторному резисторі у відсутності базового струму;
- $U_B$  – напруга на базі, виміряна за заданих умов.

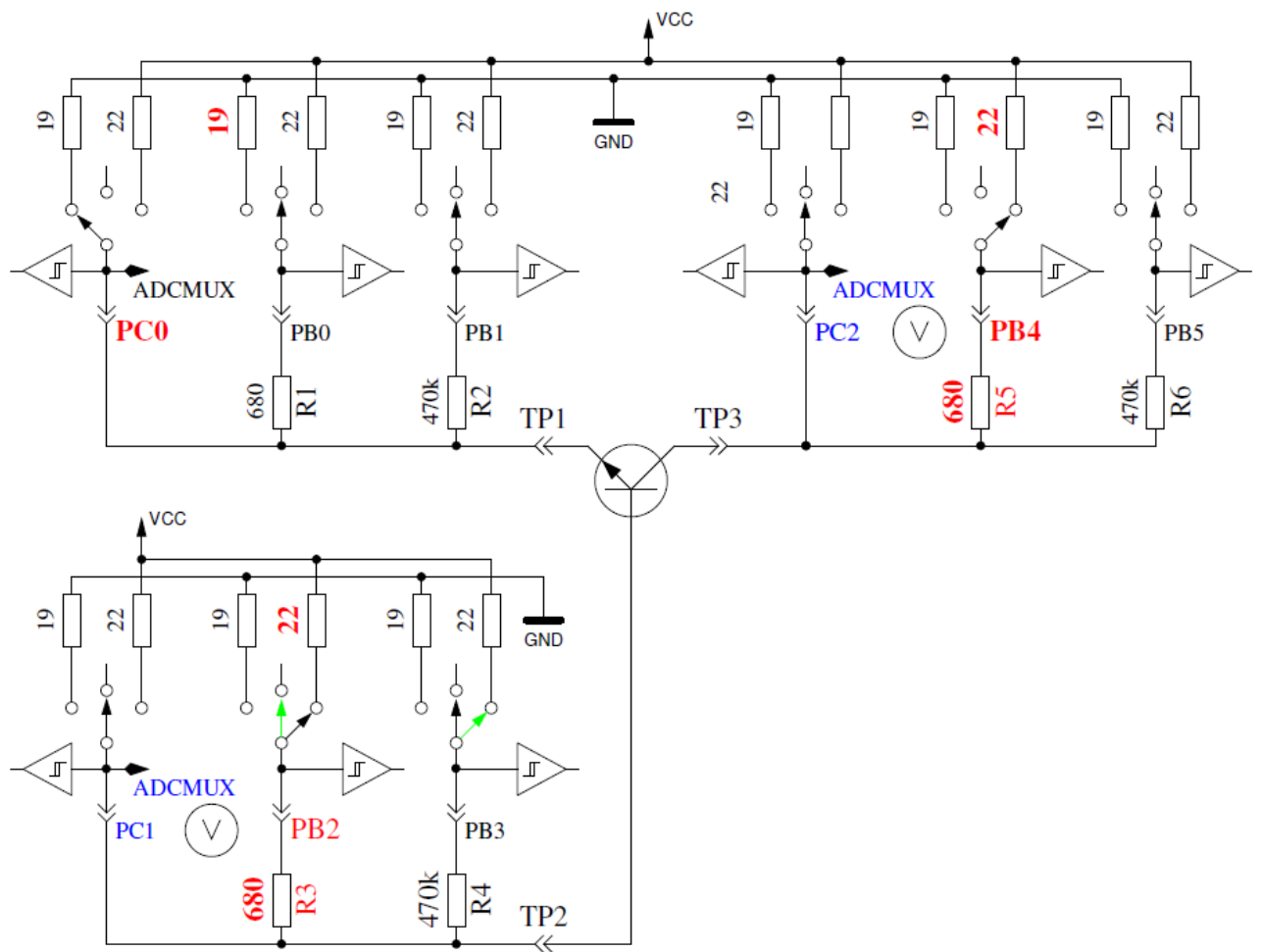


Рисунок 1.25. Вимірювання  $hFE$  N-P-N транзистора у схемі з спільним емітером

Якщо виміряна базова (або затворна) напруга виявляється високою, і в ланцюзі майже відсутній струм, це свідчить про те, що елемент є N-канальним E-MOSFET (MOSFET збагачувального типу). У цьому випадку визначення параметрів виконується за допомогою вимірювання порогової напруги затвора.

Для цього організовується плавне перемикання затвора через резистор  $470\text{ k}\Omega$  – від VCC до GND. Процес супроводжується моніторингом цифрового входу, на якому відбувається зміна стану сигналу з стоку. Після фіксації переходу зчитується напруга на затворі. Цей метод вимірювання виконується 11 разів із накопиченням результатів за допомогою АЦП, як показано на рис. 1.26. Отримане значення множать на 4 і ділять на 9, що дозволяє отримати кінцеве значення порогового напруження в мілівольтах.

Таким чином, алгоритм вимірювання N-P-N транзисторів або N Channel MOSFET передбачає початкове визначення коефіцієнта посилення у двох

конфігураціях (з використанням резисторів  $680\ \Omega$  або  $470\ k\Omega$ ), подальшу перевірку можливих тиристорних характеристик, а при відсутності таких – чітке визначення типу елемента за співвідношенням базової (або затворної) і емітерної (або джерельної) напруг. У випадку низького струму в базовому ланцюзі точне вимірювання порогового напруження затвора дозволяє ідентифікувати N-канальний E-MOSFET та отримати необхідні параметри для подальшого аналізу характеристик напівпровідникового елемента.

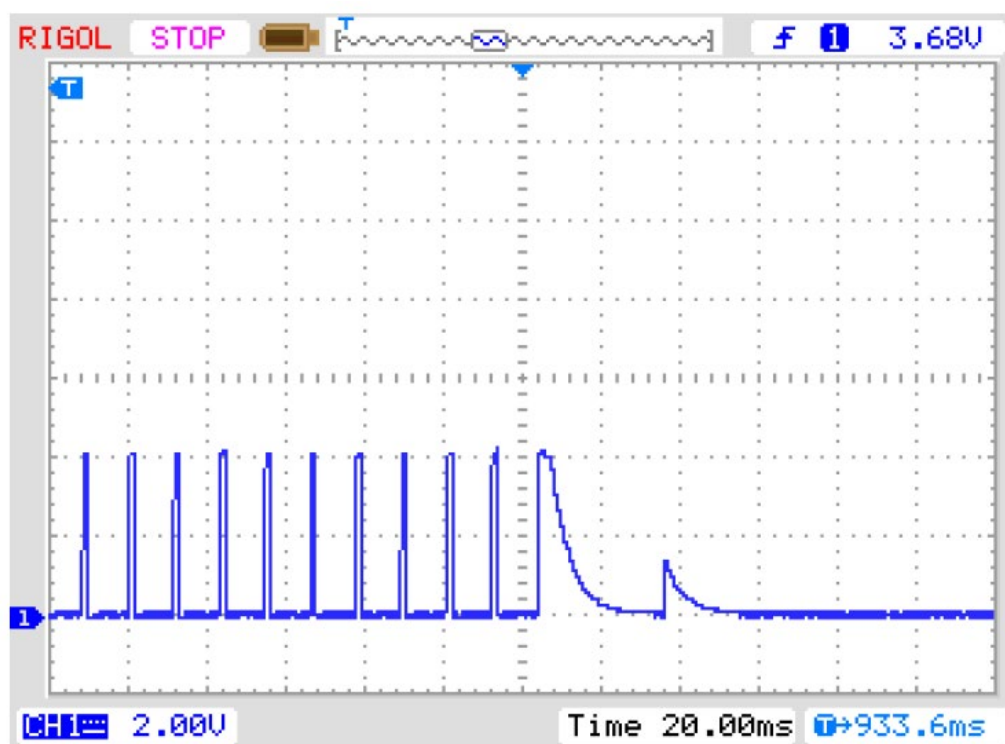


Рисунок 1.26. Вимірювання порогової напруги N-канального MOSFET

## 1.6 Отримання результатів вимірювання параметрів транзисторів за допомогою модернізованого тестеру

Модернізований тестер транзисторів (рис.1.27) забезпечує комплексний підхід до визначення параметрів біполярних та польових транзисторів. Результати вимірювань відображають важливі характеристики пристроїв, такі як ємність переходів, рівень витoku струму, коефіцієнт посилення ( $h_{FE}$ ), напругу база-емітер, а також порогові параметри для MOS-транзисторів та JFET. Для забезпечення високої точності тестер використовує два конфігураційних режими (загальний колектор та загальний емітер) і порівнює отримані результати для вибору більш достовірної величини.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

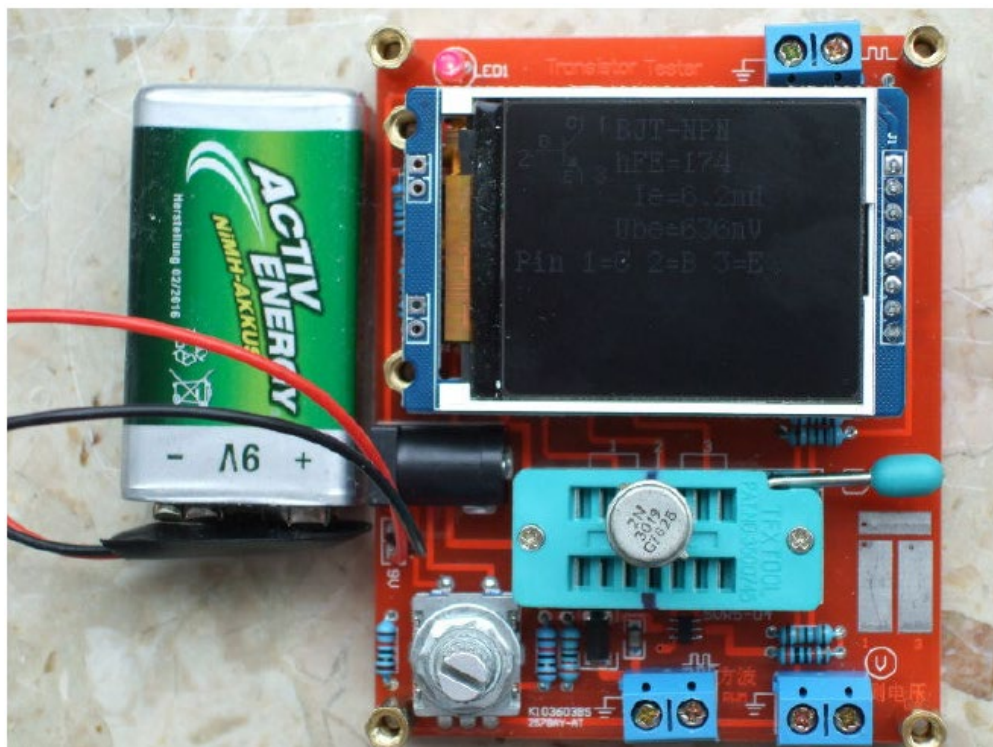
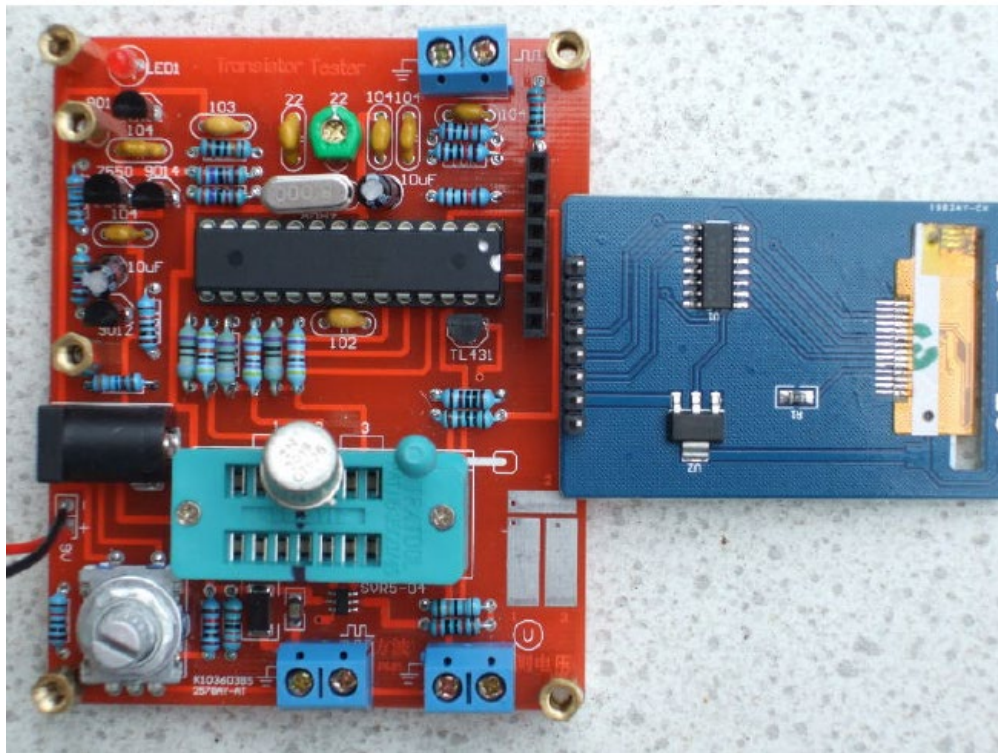


Рисунок 1.27. Зовнішній вигляд модернізованого тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері з кольоровим дисплеєм

Для біполярних транзисторів тестер автоматично визначає тип (N-P-N або P-N-P), порядок підключення виводів, показує наявність вбудованого захисного діода (якщо такий є), а також вимірює коефіцієнт посилення ( $h_{FE}$ ) та напругу база-емітер. Основні отримані результати наведені у табл.1.3.

					КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

Таблиця 1.3. Результати вимірювання параметрів біполярних транзисторів

<i>Тип транзистора</i>	<i>Тип провідності</i>	<i>Коефіцієнт підсилення та напруга база-емітер</i>
BU508A	NPN	$\beta=9, 597\text{mV}$
2N3055	NPN	$\beta=21, 550\text{mV}$
BC639	NPN	$\beta=172, 629\text{mV}$
BC640	PNP	$\beta=176, 609\text{mV}$
BC517	NPN	$\beta=24,8\text{k}, 1,22\text{V}$
BC516	PNP	$\beta=76,2\text{k}, 1,20\text{V}$
BC546B	NPN	$\beta=427, 687\text{mV}$
BC556B	PNP	$\beta=254, 668\text{mV}$
AC128 (Ge.)	PNP	$\beta=59, 191\text{mV}$
BUL38D parasitic	NPNp PNPn	$\beta=41, 617\text{mV}$ $\beta=81, 543\text{mV}$
BRY55/200	Thyrist.	0,81V
MAC97A6	Triac	0,90V

Германієві транзистори демонструють високу температурну залежність та помітний зворотний струм колектора. Основні отримані результати наведені у табл.1.4.

Таблиця 1.4. Результати вимірювання параметрів германієвих біполярних транзисторів

<i>Тип транзистора</i>	<i>Коефіцієнт підсилення та напруга база-емітер</i>
AC128	PNP, $\beta=59, 191\text{mV}$
AC116-65	PNP, $\beta=72, 149\text{mV}$
AC116-145	PNP, $\beta=146, 163\text{mV}$
AC176-65	NPN, $\beta=56, 96\text{mV}$
GC122	PNP, $\beta=56, 117\text{mV}$
GC301	PNP, $\beta=39, 188\text{mV}$
AD161	NPN, $\beta=298, 128\text{mV}$
AD162	PNP, $\beta=89, 107\text{mV}$

Для польових транзисторів (MOS-транзистори, JFET, IGBT) тестер проводить серію спеціалізованих вимірювань. Особливістю даного підходу є можливість порівняльного аналізу між різними типами елементів, що дозволяє

користувачу не лише отримати чисті числові показники, але і здійснити діагностику відносно конструкції пристрою (наприклад, визначення симетрії JFET або спостереження захисного діода у транзисторах). Основні отримані результати наведені у табл.1.5.

Таблиця 1.5. Результати вимірювання параметрів польових МОП-транзисторів

Транзистор	Тип	Виміряні параметри
ZVNL120A	N-E-MOS	D, 1,5V, 141pF
IRF530N	N-E-MOS	D, 3,6V, 1,54nF
BS170	N-E-MOS	D, 2,6V, 68pF
IRL3803	N-E-MOS	D, 2,3V, 9,71nF
IRFU120N	N-E-MOS	D, 4,2V, 913pF
BUZ71A	N-E-MOS	D, 3,2V, 708pF
ZVP2106A	P-E-MOS	D, 3,2V, 115pF
IRF5305	P-E-MOS	D, 3,6V, 2,22nF
BS250	P-E-MOS	D, 2,6V, 43pF
IRFU9024	P-E-MOS	D, 3,6V, 945pF
J310 Idss=24-60mA	N-JFET	3.1mA Vgs=2.2V
2N5459 Idss=4-16mA	N-JFET	2.1mA Vgs=1.5V
BF256C Idss=11-18mA	N-JFET	3.4mA Vgs=2.4V
BF245A Idss=2-6mA	N-JFET	1.1mA Vgs=0.75V
BF245B Idss=6-15mA	N-JFET	2.5mA Vgs=1.7V

Отримані результати відображають широкий спектр характеристик напівпровідникових елементів. Модернізована версія тестеру демонструє покращену точність завдяки врахуванню зворотного струму колектора та використанню двох незалежних схем вимірювання для визначення коефіцієнта посилення. Таким чином, модернізований тестер дозволяє проводити швидко, надійну та детальну діагностику як стандартних кремнієвих, так і германієвих, польових і силових транзисторів, що робить його потужним інструментом як для лабораторних досліджень, так і для практичного застосування в ремонтних майстернях та електронних дослідженнях.

## 2 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ

У цьому дипломному проєкті розглядається питання вдосконалення тестеру напівпровідникових транзисторів на базі AVR-мікроконтролера. Основна мета модернізації – підвищення точності вимірювань та розширення функціональності пристрою, що забезпечить більш глибокий аналіз електричних характеристик транзисторів.

В оновленій конструкції використано удосконалений алгоритм обробки даних, що дозволяє зменшити похибку вимірювань та забезпечити стабільність роботи системи. Додатково передбачено інтеграцію нових сенсорних модулів для розширеного спектру тестування напівпровідників, включаючи перевірку рівня тепловиділення, коефіцієнта підсилення та динамічних параметрів роботи транзисторів. Для цього формується перелік необхідних елементів відповідно до специфікації пристрою, який представлений у таблиці.

Таблиця 2.1. Розрахунок відомості покупних комплектуючих елементів

Найменування, тип, модель	Од.вим	Кількіс ть	Ціна, грн.	Вартість комплектуючих
Світлодіод VD1 - VD6	шт.	6	2.00	12.00
Резистор R1	шт.	1	10.00	10.00
Резистор R2 - R5	шт.	4	2.50	10.00
Резистор R6 - R8, R11- R13	шт.	6	10.00	60.00
Резистор R16-R17	шт.	2	10.00	20.00
Конденсатор C1 - C3	шт.	3	5.00	15.00
Конденсатор C4	шт.	1	20.00	20.00
Конденсатор C5, C6	шт.	2	10.00	20.00
Шина X1, X4	шт.	2	7.00	14.00
Дисплей LCD1	шт.	1	100.00	100.00
Мікросхема DD1	шт.	1	150.00	150.00
Мікросхема DD2	шт.	1	120.00	120.00
Мікросхема DD3	шт.	1	100.00	100.00
Тумблер SW1 - SW2	шт.	2	7.00	14.00
Загальна вартість покупних комплектуючих елементів				683
Транспортні витрати (10%)				68,3
Всього (Впк)				751,3

Оскільки розроблений пристрій належить до радіоелектронної апаратури, можна визначити розподіл витрат у його структурі. Частка матеріалів у загальній вартості становить 20% ( $\alpha_m = 20\%$ ), а частка покупних комплектуючих досягає 62% ( $\alpha_{пк} = 62\%$ ). Крім того, питома вага основної заробітної плати складає 18% ( $\alpha_{озп} = 18\%$ ), що враховує оплату праці спеціалістів, залучених до розробки та складання пристрою.

Таблиця 2.2. Калькуляція планової собівартості

Найменування статті витрат	Значення статті, грн.	Розрахунок
1. Сировина та матеріал	242,35	$V_m = \alpha_m * V_{пк}/\alpha_{пк}$ $V_m = 0,2 * 751,3 / 0,62$
2. Комплектуючі вироби та покупні напівфабрикати	751,3	$V_{пк} = \text{см.табл.2.1}$ 751,3
3. Основна заробітна плата	218,12	$V_{оз} = \alpha_{озп} * V_{пк}/\alpha_{пк}$ $V_{оз} = 0,18 * 751,3 / 0,62$
4. Додаткова заробітна плата	87,25	$V_{дз} = 0,4 * V_{оз}$ $V_{дз} = 0,4 * 218,12$
5. Відрахування о єдиного соцфонду	67,18	$V_{ес} = (V_{оз} + V_{дз}) * 0,22$ $V_{ес} = (218,12 + 87,25) * 0,22$
6. Загально-виробничі витрати	261,74	$V_{заг.вир} = (0,8 \dots 1,5) * V_{оз}$ $V_{заг.вир} = 1,2 * 218,12$
7. Виробнича собівартість	1627,94	$S_{вир} = \sum V$ $= 242,35 + 751,3 + 218,12 + 87,25 + 67,18 + 261,74$
8. Адміністративні витрати	65,45	$V_a = V_{оз} * 0,3$ $V_a = 0,3 * 218,12$
9. Витрати на збут	32,56	$V_{зб} = S_{вир} * 0,02$ $V_{зб} = 1627,94 * 0,02$
10. Інші операційні витрати	16,28	$V_{оп} = S_{вир} * 0,01$ $V_{оп} = 1627,94 * 0,01$
Повна собівартість	1742,23	$S_{пов.} = \sum \Sigma$ $S_{пов.} = 1627,94 + 65,45 + 32,56 + 16,28$

Розмір планового прибутку, це включається у ціну, визначаємо по формулі:

$$П = (S_{пов} * p) / 100\% = 1742,23 * 10 / 100 = 174,22 \text{ грн.} \quad (2.1)$$

де  $p$ -планова рентабельність продукції (10%...30%).

Оптову ціну виробу визначаємо по формулі:

$$C_o = C_{\text{пов}} + \Pi = 1742,23 + 174,22 = 1916,45 \text{ грн.} \quad (2.2)$$

Ціну реалізації виробу встановлюємо із урахуванням ПДВ:

$$C_p = C_o + \Pi_z,$$

де  $\Pi_z$  – податкове зобов'язання із ПДВ:

$$\Pi_z = C_o * 0,2 = 1916,45 * 0,2 = 383,29 \text{ грн.}$$

Звідси:

$$C_p = 1916,45 + 383,29 = 2299,74 \text{ грн.}$$

Розрахована в таблиці 2.2. повна собівартість визначає витрати на виробництво (Спк) однієї одиниці пристрою в рамках поточного року випуску. Для подальшого аналізу пропонується прогноз обсягів реалізації цього виробу на другій стадії його життєвого циклу — «Виробництво». Прогнозований розподіл продажів охоплює період у 4 роки. Візуальне представлення ключових зон промислового випуску пристрою наведено на рисунку 2.1.

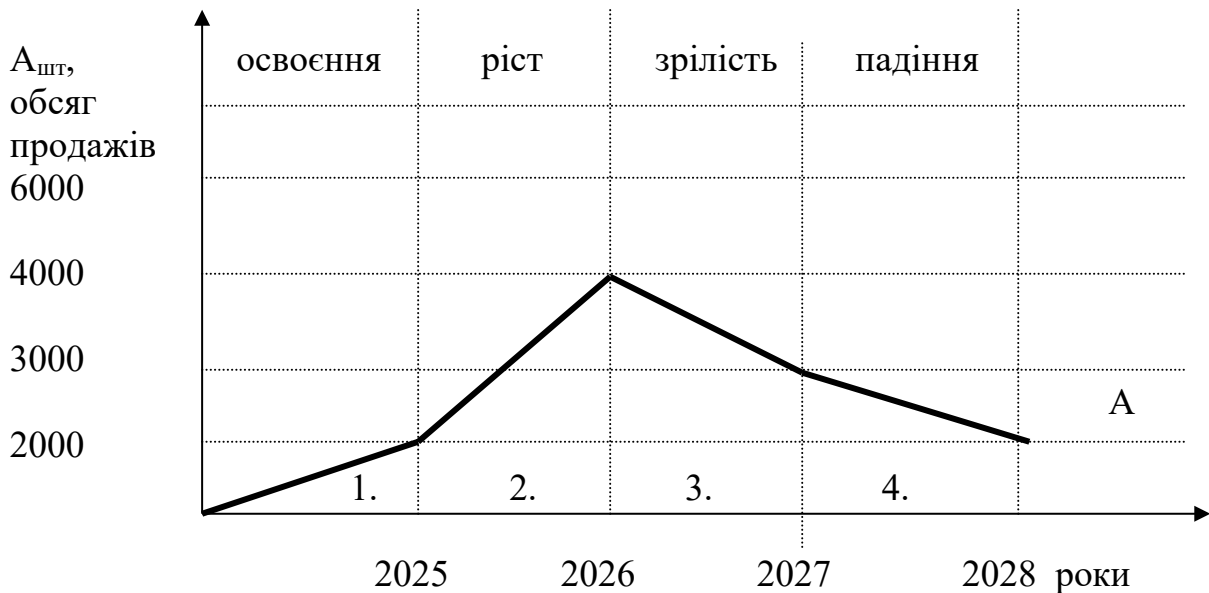


Рисунок 2.1. Роки та зони розрахункового періоду

У 2025 році запланований обсяг продажів становитиме 100 одиниць за індивідуальними замовленнями. На наступний рік очікується збільшення кількості реалізованої продукції, що потребує коректного розрахунку виробничих витрат. Для цього використовується відповідна формула оцінки витрат:

$$C_{\text{пі}} = C_{\text{пі}} \left( \frac{A}{A} \right)_{i=1}^{0.23}, \quad (2.3)$$

де

$A_i$  – обсяг продажів (виробництва) у 1 рік розрахункового періоду, шт.;

$A_{i+1}$  – обсяг продажів (i+1)-го року, шт.;

0,23 – показник ступеня.

Звідси випливає, що при зростанні виробничих потужностей ефект економії масштабу може сприяти зменшенню собівартості за рахунок оптимізації ресурсів, зниження витрат на одиницю товару та більш ефективного використання матеріалів і технологічних процесів.

$$C_{2025} = 1742,23 \text{ грн.}$$

$$C_{2026} = C_{2025} * (2000/4000)^{0.23} = 1742,23 * (2000/4000)^{0.23} = 1480,89 \text{ грн.}$$

При відсутності росту обсягів виробництва, тобто якщо обсяг продажів чи не змінюється чи зменшується у наступному році, витрати виробництва приймаються на рівні попереднього року.

$$C_{2028} = C_{2027} = C_{2026} = 1480,89 \text{ грн}$$

Плановий прибуток, це включається у оптову ціну підприємства, задля наступного року при збільшенні обсягу продажів, визначаємо по формулі:

$$P_{i+1} = C_{ni+1} * \frac{\rho}{100} \quad (2.4)$$

Звідси:

$$P_{2025} = 174,22 \text{ грн}$$

$$P_{2026} = P_{2027} = P_{2028} = 1480,89 * 0,1 = 148,09 \text{ грн.}$$

Оптову ціну підприємства у наступні роки розрахункового періоду визначаємо по формулі:

$$C_{O_{i+1}} = C_{ni+1} + P_{i+1} \quad (2.5)$$

Звідси:

$$C_{2025} = 1916,45 \text{ грн.}$$

$$C_{2026} = C_{2027} = C_{2028} = 1480,89 + 148,09 = 1628,98 \text{ грн}$$

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Податкове зобов'язання визначається по формулі:

$$Пз_{i+1} = Ц_{o_{i+1}} * 0.2 \quad (2.6)$$

Звідси:

$$Пз_{2025} = 383,29 \text{ грн.}$$

$$Пз_{2026} = Пз_{2027} = Пз_{2028} = 1628,98 * 0,2 = 325,79 \text{ грн.}$$

Ціну реалізації одиниці продукції у наступні роки визначаємо по формулі:

$$Ц_{P_{i+1}} = Ц_{O_{i+1}} + Пз_{i+1} \quad (2.7)$$

Звідси:

$$Ц_{p_{2025}} = 2299,74 \text{ грн.}$$

$$Ц_{p_{2026}} = Ц_{p_{2027}} = Ц_{p_{2028}} = 1628,98 + 325,79 = 1954,77 \text{ грн.}$$

Вартісну оцінку результатів за розрахунковий період ( $P_T$ ) визначаємо по формулі:

$$P_T = \sum_{i=t_p}^{t_k} A_i * Ц_{P_i} * \alpha_i \quad (2.8)$$

де  $t_p, t_k$  – відповідно розрахунковий і кінцевий рік розрахункового періоду;

$Ц_{P_i}$  – ціна реалізації в  $i$ -тім році, грн.;

$A_i$  – обсяг продажів у  $i$ -тім році, грн.;

$\alpha_i$  – коефіцієнт приведення витрат до розрахункового року враховує фактор часу та економічні зміни. Вартісна оцінка здійснюється за методикою, представленою в таблиці.

Таблиця 2.3. Розрахунок вартісної оцінки результатів

Найменування показника	Позначення	Розрахунок виробничого періоду			
		1-й	2-й	3-й	4-й
Обсяг продажів, шт	$A_i$	2000	4000	3000	2000
Ціна реалізації, грн.	$Ц_{P_i}$	2299,74	1954,77	1954,77	1954,77
Вартісна оцінка результатів, млн. грн.	$A_i * Ц_{P_i}$	4,599	7,819	5,864	3,909
Коефіцієнт, що враховує фактор часу	$\alpha_i$	0.91	0.83	0.75	0.68
Вартісна оцінка результатів з урахуванням фактора часу, млн. грн.	$A_i * Ц_{P_i} * \alpha_i$	4,185	6,489	4,398	2,658

Виробництво дає змогу одержати дохід за 4 роки 3,665 млн. грн.

### 3 РОЗДІЛ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Закон України «Про охорону праці» є одним із ключових нормативних актів, що регламентує захист життя та здоров'я громадян у процесі трудової діяльності. Він встановлює основні принципи організації безпечних умов праці, регулює відносини між роботодавцем і працівником у питаннях гігієни, охорони праці та виробничого середовища.

У дипломному проєкті розглядається процес модернізації тестеру напівпровідникових транзисторів на базі AVR-мікроконтролера. Враховуючи специфіку виконання інженерних робіт, особлива увага приділяється дотриманню вимог безпеки при проведенні монтажних та налагоджувальних операцій, використанні електронних компонентів, а також забезпеченні безпечних умов для працівників.

Під час модернізації пристрою важливим аспектом є відповідність робочого середовища стандартам охорони праці. Зокрема, дотримання норм електробезпеки, правильна організація робочого місця, використання антистатичних матеріалів та захисного обладнання дозволяють мінімізувати ризики ураження електрострумом або пошкодження компонентів.

У цьому розділі здійснюється аналіз ключових вимог безпеки, що впливають на організацію робочого процесу при модернізації пристрою. Особлива увага приділяється безпечному використанню паяльного обладнання, дотриманню норм термозахисту, контролю рівня випаровувань від припою та захисту від впливу електромагнітного випромінювання. Комплексний підхід до реалізації заходів охорони праці дозволяє гарантувати безпечну експлуатацію пристрою та комфортні умови для працівників, які здійснюють його модернізацію.

#### 3.1 Аналіз небезпечних і шкідливих факторів

У процесі вдосконалення тестеру напівпровідникових транзисторів необхідно враховувати низку факторів, що можуть впливати на безпеку працівника. До них належать електромагнітне випромінювання від роботи

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		68

мікроконтролера, можливі перепади електричної напруги під час тестування, оптимальне освітлення робочого місця для точного аналізу електронних компонентів, а також тепловий вплив при проведенні пайки та монтажу нових модулів.

Важливо організувати робоче середовище таким чином, щоб мінімізувати вплив шкідливих чинників і забезпечити комфортні умови для оператора. Це включає використання антистатичних браслетів та килимків для запобігання електростатичному розряду, контроль параметрів освітлення для зниження навантаження на зір, а також застосування термостійких рукавичок та системи вентиляції для захисту від випаровувань при пайці.

### **3.2 Гігієнічні вимоги до виробничого середовища**

Для забезпечення ефективної роботи над модернізованим тестером напівпровідникових транзисторів необхідно враховувати умови виробничого середовища. Освітлення робочого місця має відповідати встановленим нормам (300–400 лк згідно з ДБН В.2.5-28:2018), що сприяє зменшенню навантаження на зір під час аналізу характеристик транзисторів та роботи з дрібними електронними компонентами.

Робоче приміщення повинно бути оснащене ефективною вентиляцією для регулювання температури та рівня вологості. Оптимальна температура повітря становить 18–20°C у холодну пору року та 22–25°C у теплу, а рівень вологості – 40–60%. Це дозволяє створити комфортні умови для тривалої роботи з електронними пристроями.

Особливу увагу слід приділити захисту працівників від електромагнітного випромінювання, яке може виникати в процесі тестування транзисторів. Використання екранів, правильне розташування приладів та дотримання відповідних вимог електробезпеки дозволяє мінімізувати можливі ризики.

Також важливим аспектом є шумоізоляція та зменшення рівня вібрацій у приміщенні, де проводяться монтажні та пайкові роботи. Застосування

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		69

шумоізолюючих матеріалів та спеціальних амортизаційних конструкцій сприяє підвищенню продуктивності працівників та зменшенню їхньої втоми.

Створення сприятливого виробничого середовища забезпечує не лише комфорт для працівників, а й покращує точність проведення тестувань, підвищуючи якість та надійність модернізованого пристрою.

### **3.3 Вимоги безпеки праці працівника**

Безпека працівника під час роботи з паяльними інструментами та електронними пристроями є першочерговим завданням. Необхідно дотримуватися таких заходів:

Використання індивідуальних засобів захисту – працівник повинен працювати у захисних рукавичках, спеціальному одязі та з використанням ізоляційного покриття на робочій поверхні.

Дотримання правильного розташування робочого місця – важливо розташувати технічне обладнання таким чином, щоб уникнути ризику перекидання чи випадкового контакту з нагрітими частинами.

Контроль електробезпеки – всі пристрої, які використовуються в роботі, повинні мати заземлення та відповідати технічним стандартам безпеки.

Дотримання правил експлуатації обладнання – працівник повинен перевіряти справність інструментів перед початком роботи та уникати використання пошкодженого обладнання.

### **3.4 Правила безпеки праці при паянні**

При виконанні паяльних робіт слід дотримуватися таких правил:

- Забороняється використання несправних інструментів.
- Не можна торкатися до нагрітих частин паяльника, щоб уникнути опіків.
- Обов'язкове використання витяжки для видалення шкідливих парів припою.

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
						70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Деталі утримувати плоскогубцями або спеціальними інструментами, щоб уникнути прямого контакту з гарячими компонентами.
- Регулярно провітрювати приміщення та дотримуватися санітарних норм після завершення роботи.

### 3.5 Пожежна безпека

Пожежна безпека є одним із критичних аспектів організації робочого місця, особливо при роботі з електронними пристроями, такими як система калібрування моніторів. Основними причинами виникнення пожеж у виробничому приміщенні можуть бути:

- Несправність електрообладнання – коротке замикання, перевантаження електромережі та механічні пошкодження електрокабелів.
- Неправильне зберігання легкозаймистих матеріалів – відкриті ємності з хімічними речовинами, займисті припої та ізоляційні матеріали.
- Порушення техніки безпеки при пайці – попадання розплавленого припою на горючі матеріали, перегрів електропаяльників та залишення нагрітого обладнання без нагляду.
- Недотримання правил експлуатації електромереж – використання несправних розеток, відсутність захисного заземлення та неправильне підключення обладнання.
- Необережне поводження з вогнем – використання відкритого полум'я у робочому приміщенні, паління та неправильне поводження з нагрітими предметами.

Для запобігання пожежам необхідно дотримуватися ряду заходів безпеки:

- Систематичний контроль електромережі – перед початком роботи слід перевірити справність розеток, проводів та електроприладів.
- Забезпечення робочого приміщення засобами пожежогасіння – кожне місце роботи повинно бути оснащене необхідними протипожежними засобами, такими як:
- Вогнегасник (порошковий або вуглекислотний, залежно від специфіки

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

приміщення).

- Азбестове покриття для гасіння невеликих локальних займання.
- Ящик з піском об'ємом не менше 0,5 м<sup>3</sup> для ліквідації розливів рідких займистих речовин.
- Лопати та відра для ефективного використання піску.



Рисунок 3.1. Пожежний захист

Пожежні щити мають бути розміщені на видимих місцях та містити необхідний набір засобів для оперативної ліквідації займання.

Щоб мінімізувати ризик виникнення пожеж, робоче місце має відповідати наступним вимогам:

Запасні виходи повинні бути позначені світловими покажчиками із написом «Запасний вихід», видимими навіть при недостатньому освітленні.

Вогнегасники слід розміщувати на видимих місцях, на висоті не більше 1,5 м від підлоги для швидкого доступу.

					КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

## ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломного проекту отримано модернізований тестер, побудований на базі мікроконтролера ATmega328, який продемонстрував високу точність, надійність та енергозбереження, що дозволило ефективно проводити діагностику широкого спектру напівпровідникових елементів. Завдяки реалізації алгоритмів вимірювання в двох режимах – за схемою з загальним колектором та за схемою з загальним емітером, вдалося досягти високої точності визначення таких критичних показників, як коефіцієнт посилення, порогова напруга база-емітер, ємність переходів і рівень витоку струму, що значно покращило якість діагностики. Особливу увагу було приділено врахуванню зворотного струму колектора під час вимірювання біполярних та германієвих транзисторів, що дозволило скоригувати значення посилення і запобігти помилковій ідентифікації елементів з вбудованими захисними діодами або паразитними характеристиками.

Модернізована система забезпечує автоматичне визначення типу напівпровідникових елементів, таких як NPN і PNP біполярні транзистори, а також N- і P-канальні MOSFET і JFET транзистори, і автоматично визначає розташування їх виводів. Отримані дані відображаються на графічному дисплеї з використанням інтерфейсів SPI або I2C, що дозволяє забезпечити чітке, зручне і інтуїтивно зрозуміле подання результатів. Окрім того зменшено споживання струму в режимі сну (до 20 нА), що дозволяє пристрою працювати від автономного джерела живлення, що є вагомим перевагою для польових застосувань та інспекцій в умовах обмежених ресурсів енергії.

Модернізований тестер демонструє високу ефективність завдяки поєднанню точних алгоритмів вимірювання, розширеним можливостям відображення результатів. Завдяки врахуванню зворотного струму колектора і використанню двох методів оцінки параметрів випробовуваних елементів, тестер дозволяє отримувати достовірні дані і уникати помилок у визначенні характеристик, що робить його потужним інструментом для діагностики як стандартних, так і специфічних напівпровідникових компонентів.

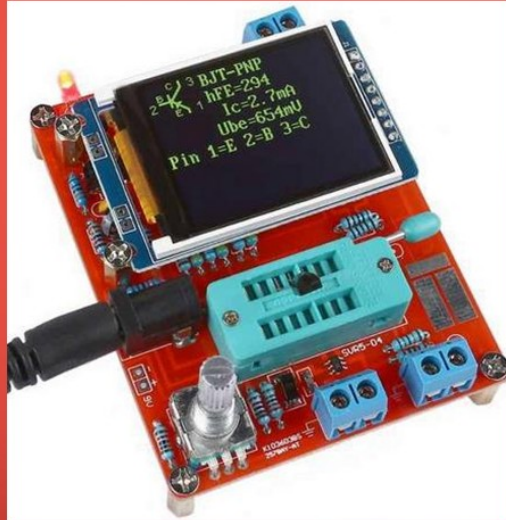
					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

# ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Зуб А.Ю. Модернізація електронних тестерів: аналіз сучасних технологій. – Дніпро: Видавничий дім «Техносфера», 2022. – 250 с.
2. Романенко О., Коваленко Л. Тестування напівпровідникових пристроїв: сучасні методи та інструменти. – Київ: Видавничий дім «Наукова думка», 2023. – 200 с.
3. Іваненко А., Петров С. Основи роботи з АТmega328: практичний посібник. – Київ : Видавничий дім «Електроніка», 2020. – 256 с.
4. Богданов П.С. Сучасні мікроконтролерні технології: навчальний посібник. – Харків : Видавничий дім «Факт», 2022. – 312 с.
5. Полещук В.М. Системи управління на основі AVR мікроконтролерів. – Львів: Видавничий дім «Світ науки», 2021. – 280 с.
6. Сидоренко І.В. Мікропроцесорні системи: теорія та практика. – Одеса: Одеський національний технічний університет, 2020. – 300 с.
7. Маркус Ф. AVR Transistortester [Електронний ресурс]: Embedded Projects Journal, 11 вип. – 2011.
8. Коваленко О. Електроніка сьогодні: журнал високотехнологічних систем управління / ред. О. Коваленко. – Київ: Видавничий дім «Інформаційні технології», 2024. – 120 с.
9. «Електроніка Україна»: сучасні тенденції в українській електроніці [Електронний ресурс]. – 2023, №3. – Режим доступу: <http://www.electronics-ukraine.ua/news> (Дата звернення: 30.03.2025).
- 10.«Електроніка та інформаційні технології» [Електронний ресурс]: науковий журнал. – Львів, ISSN 2224-087X (друк), ISSN 2224-0888 (онлайн). – Режим доступу: <https://ait.knu.ua/> (Дата звернення: 30.03.2025).
11. Найновіші дослідження в галузі електроніки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://lib.chdtu.edu.ua/resursi/elektronni/vidannya-onlajn/> (Дата звернення: 30.03.2025).

					<b>КС 58. 22 000. 00 ДП ПЗ</b>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

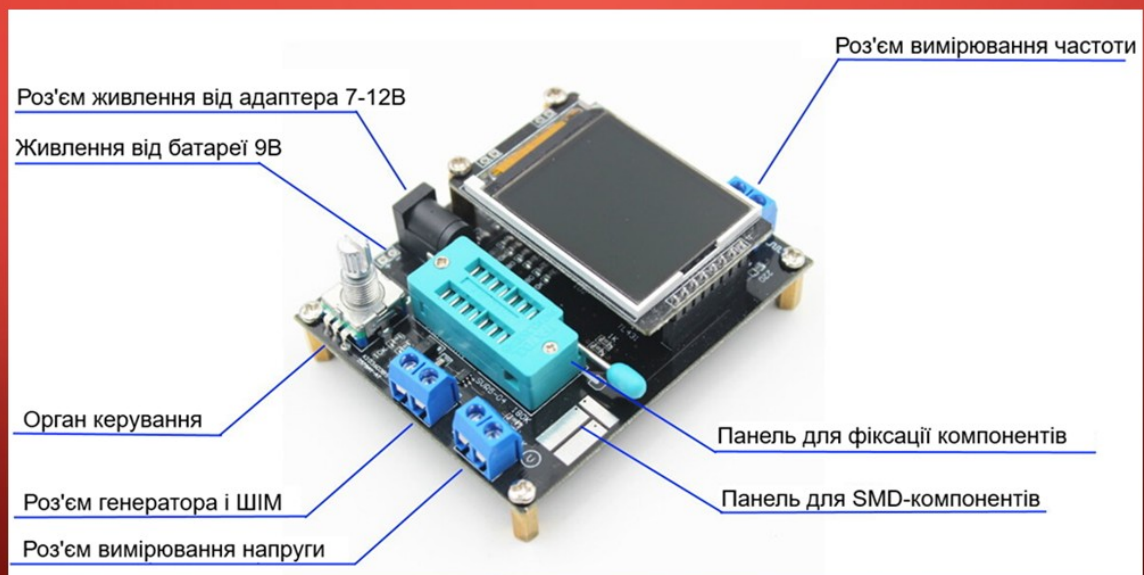
## ДОДАТОК А. Слайди мультимедійної презентації



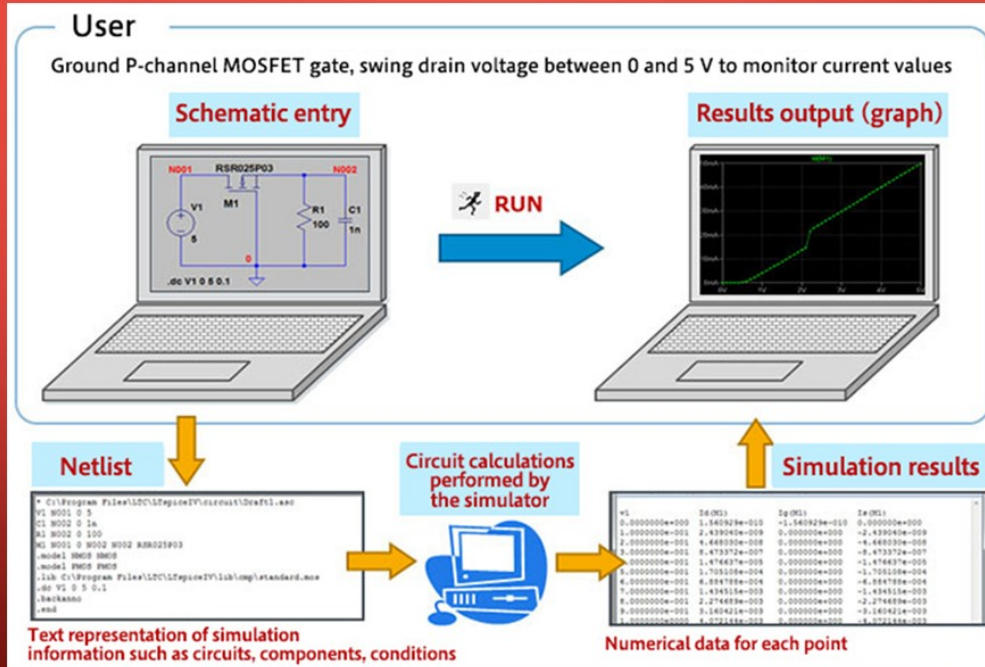
### МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕСТЕРУ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ТРАНЗИСТОРІВ НА AVR-МІКРОКОНТРОЛЕРІ

Янакі Олександр, гр.4КС-58

Тестер транзисторів GM328A (на базі проекту Markus Frejek AVR-Transistortester, Embedded Projects Journal, 11 Ausgabe, 2011)



# Моделювання роботи транзистору у симуляторі SPICE

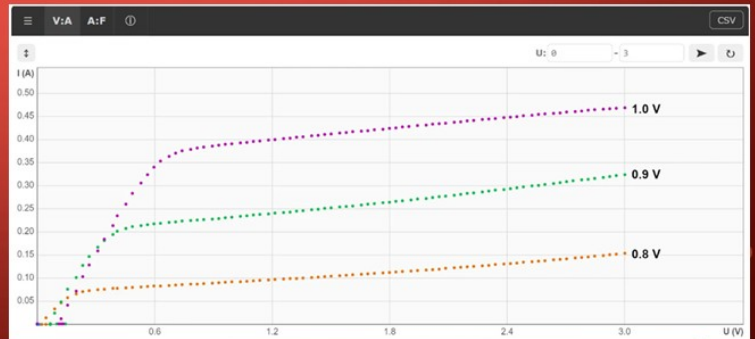
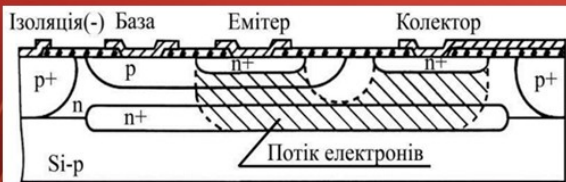


## Основні SPICE-параметри моделі біполярного транзистора

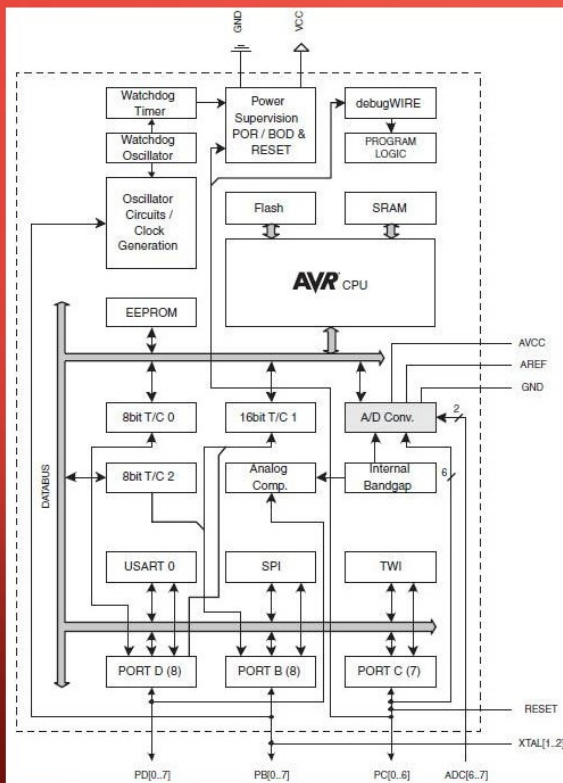
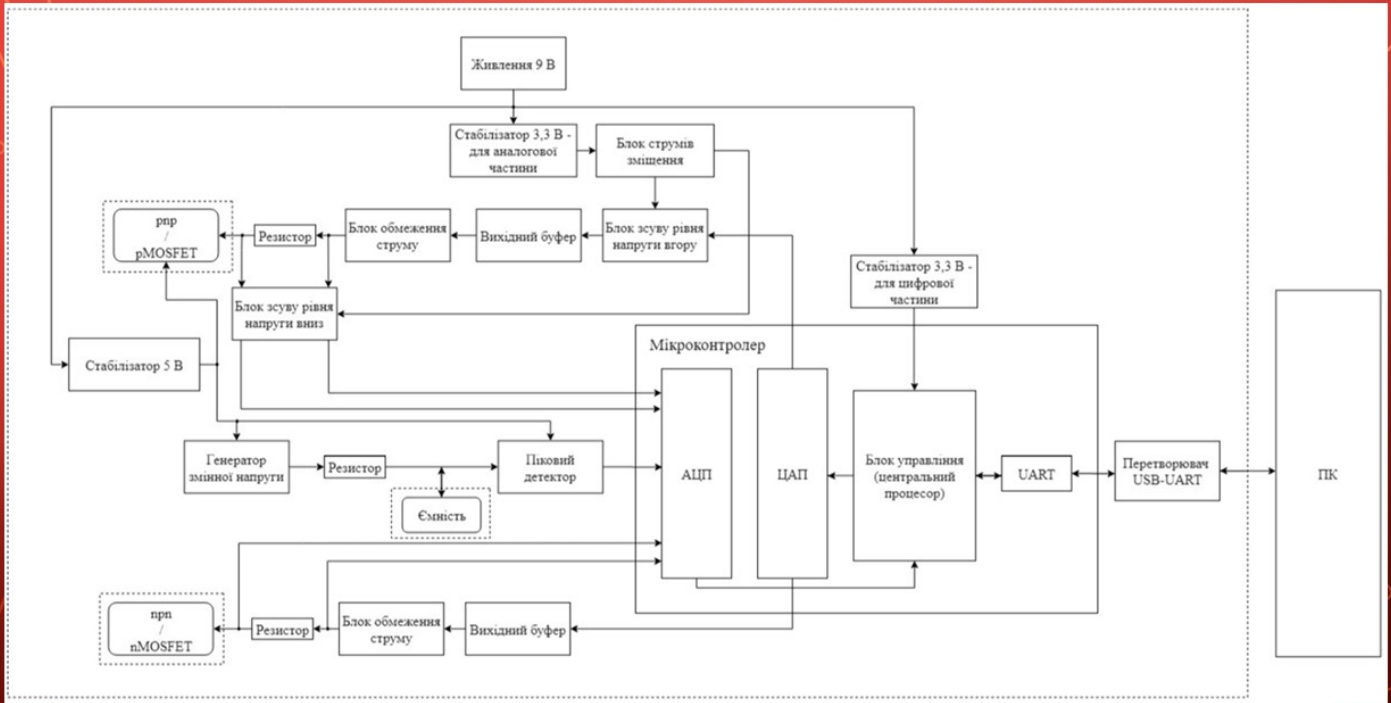
SPICE-параметр	Позначення	Назва параметра	Одиниці вимірювання
IS	$I_s$	Струм насичення	А
BF	$\beta_f$	Ідеальний коефіцієнт підсилення струму	—
VAf	$V_{Af}$	Напруга Ерлі	В
CJE	$C_{je}$	Бар'єрна ємність база-емітерного переходу при нульовому зміщенні	Ф
CJC	$C_{jc}$	Бар'єрна ємність база-колекторного переходу при нульовому зміщенні	Ф

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) біполярного транзистора

## Структура транзистора n-p-n типу



# Структурна схема тестеру транзисторів на AVR-мікроконтролері



Структура AVR-мікроконтролера ATmega328

# Принципова електрична схема модернізованого тестеру транзисторів

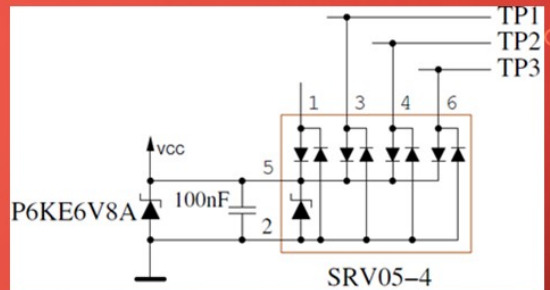
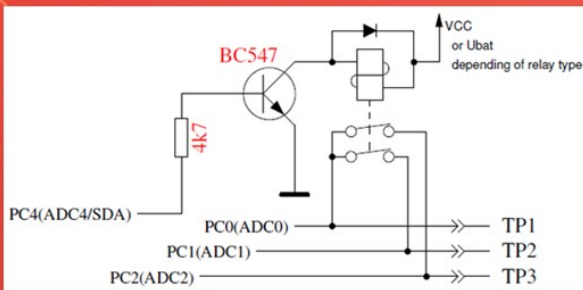
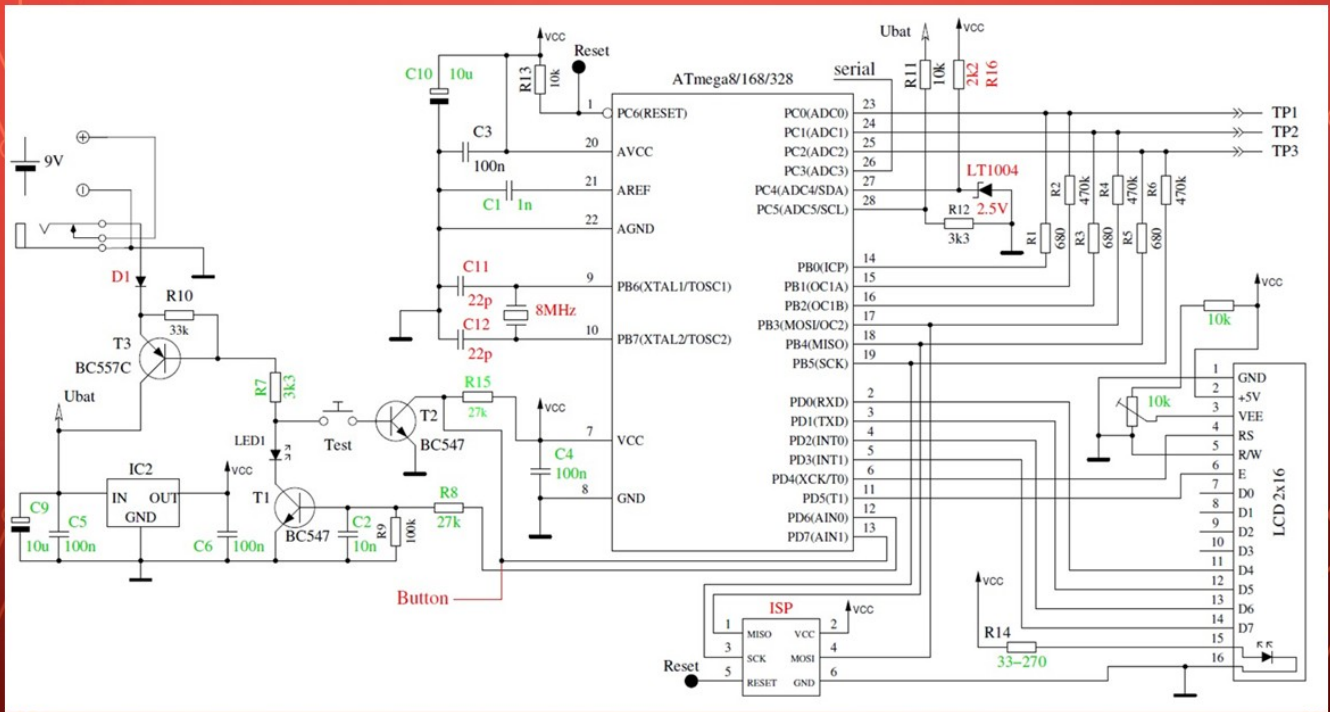


Схема захисту портів Atmega із використанням реле

Схема захисту портів Atmega із використанням діодів

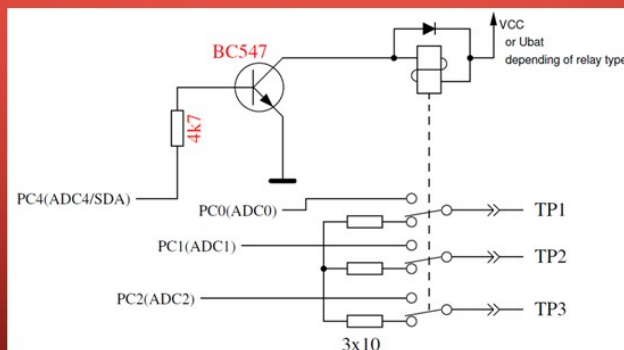


Схема захисту портів АТmega із використанням реле з трьома групами контактів

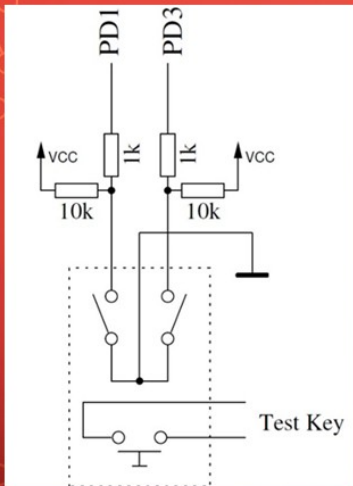
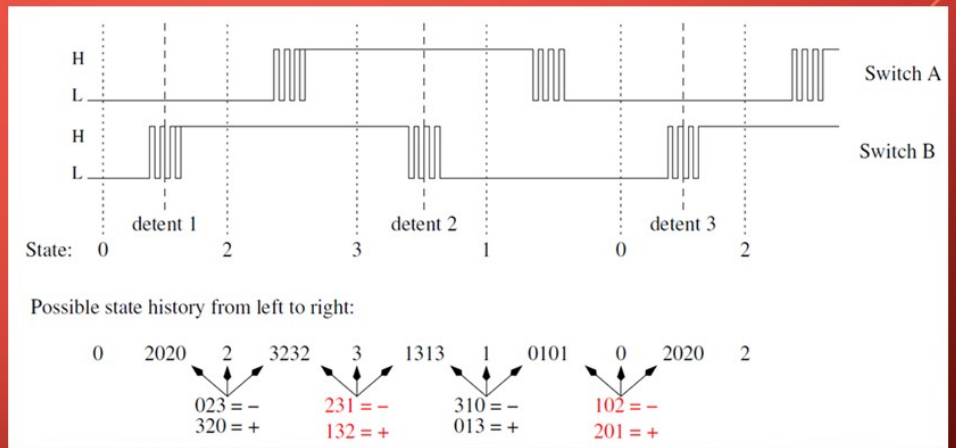
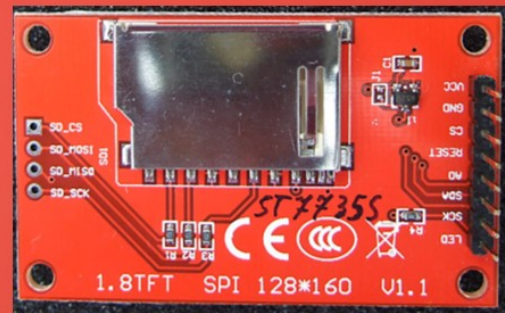


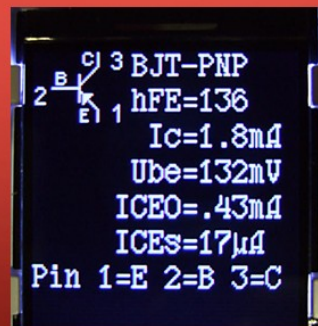
Схема підключення поворотного енкодера



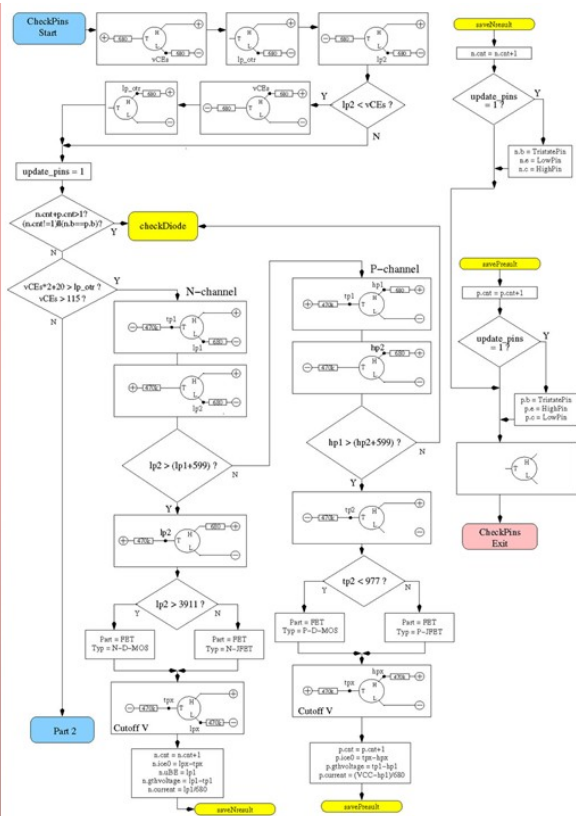
Діаграма енкодера з корекцією брязкоту контактів перемикачів



Підключення модулів кольорових дисплеїв двох типів

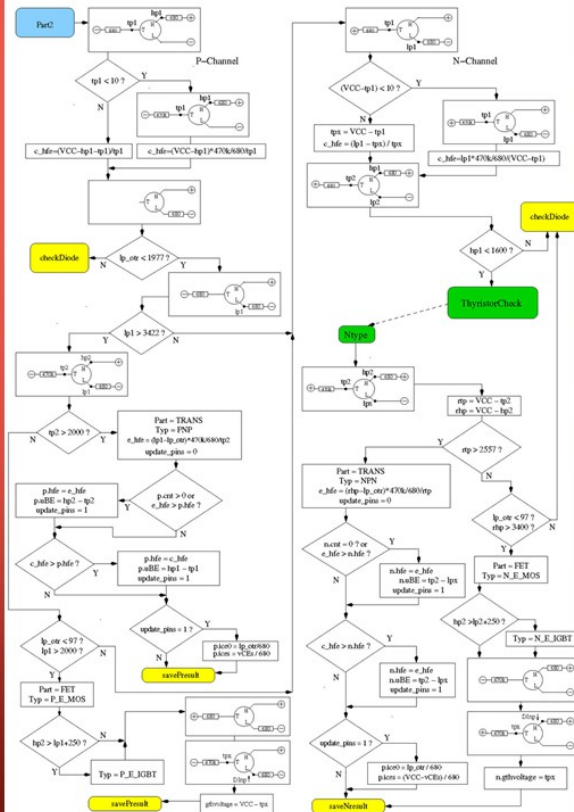


Тестування біполярного P-N-P транзистора



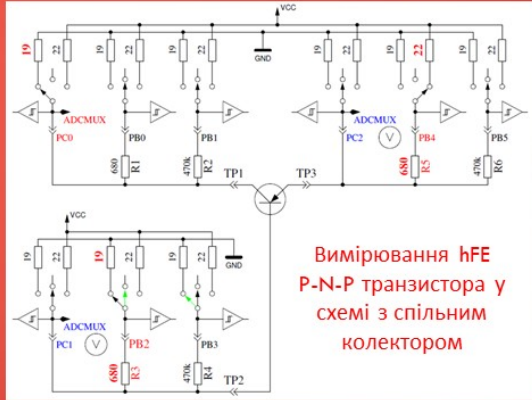
## Блок-схема алгоритму тестування транзисторів JFET і D-MOS

## Блок-схема алгоритму тестування транзисторів BJT і E-MOS

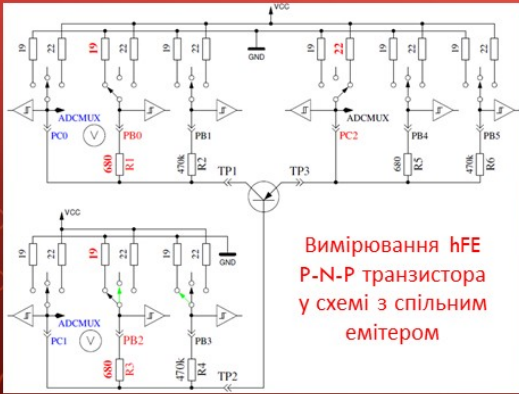




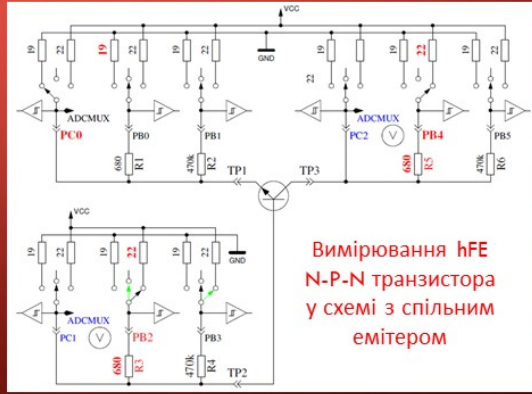
Вимірювання  
напруги затвор-  
витік і струму  
витоку N-JFET



Вимірювання hFE  
P-N-P транзистора у  
схемі з спільним  
колектором

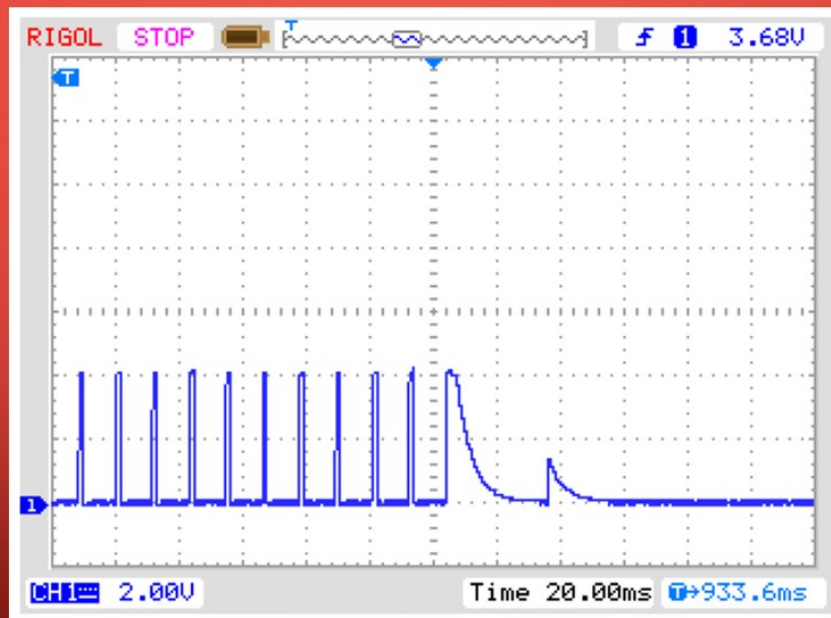


Вимірювання hFE  
P-N-P транзистора  
у схемі з спільним  
емітером

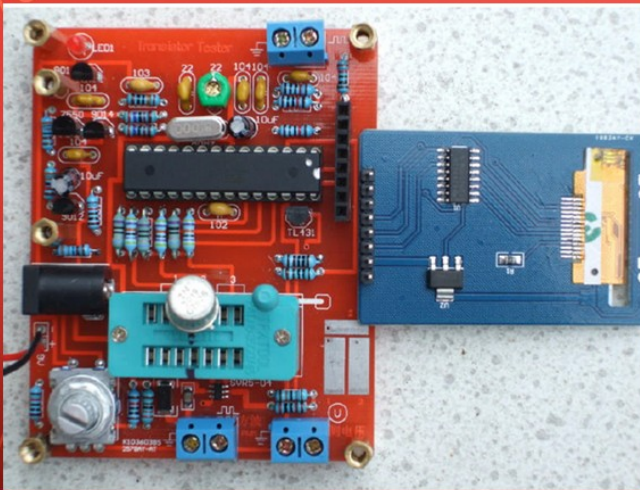


Вимірювання hFE  
N-P-N транзистора  
у схемі з спільним  
емітером

## Вимірювання порогової напруги N-канального MOSFET



## Зовнішній вигляд модернізованого тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері з кольоровим дисплеєм



Тип транзистора	Тип провідності	Коефіцієнт підсилення та напруга база-емітер
BU508A	NPN	$\beta=9$ , 597mV
2N3055	NPN	$\beta=21$ , 550mV
BC639	NPN	$\beta=172$ , 629mV
BC640	PNP	$\beta=176$ , 609mV
BC517	NPN	$\beta=24,8k$ , 1,22V
BC516	PNP	$\beta=76,2k$ , 1,20V
BC546B	NPN	$\beta=427$ , 687mV
BC556B	PNP	$\beta=254$ , 668mV
AC128 (Ge.)	PNP	$\beta=59$ , 191mV
BUL38D parasitic	NPNp	$\beta=41$ , 617mV
BRY55/200	Thyrist.	0,81V
MAC97A6	Triac	0,90V

Результати вимірювання параметрів біполярних транзисторів

Тип транзистора	Коефіцієнт підсилення та напруга база-емітер
AC128	PNP, $\beta=59$ , 191mV
AC116-65	PNP, $\beta=72$ , 149mV
AC116-145	PNP, $\beta=146$ , 163mV
AC176-65	NPN, $\beta=56$ , 96mV
GC122	PNP, $\beta=56$ , 117mV
GC301	PNP, $\beta=39$ , 188mV
AD161	NPN, $\beta=298$ , 128mV
AD162	PNP, $\beta=89$ , 107mV

Результати вимірювання параметрів германієвих біполярних транзисторів

Транзистор	Тип	Виміряні параметри
ZVNL120A	N-E-MOS	D, 1,5V, 141pF
IRF530N	N-E-MOS	D, 3,6V, 1,54nF
BS170	N-E-MOS	D, 2,6V, 68pF
IRL3803	N-E-MOS	D, 2,3V, 9,71nF
IRFU120N	N-E-MOS	D, 4,2V, 913pF
BUZ71A	N-E-MOS	D, 3,2V, 708pF
ZVP2106A	P-E-MOS	D, 3,2V, 115pF
IRF5305	P-E-MOS	D, 3,6V, 2,22nF
BS250	P-E-MOS	D, 2,6V, 43pF
IRFU9024	P-E-MOS	D, 3,6V, 945pF
J310	N-JFET	3.1mA Vgs=2.2V
Idss=24-60mA		
2N5459	N-JFET	2.1mA Vgs=1.5V
Idss=4-16mA		
BF256C	N-JFET	3.4mA Vgs=2.4V
Idss=11-18mA		
BF245A	N-JFET	1.1mA Vgs=0.75V
Idss=2-6mA		
BF245B	N-JFET	2.5mA Vgs=1.7V
Idss=6-15mA		

Результати вимірювання параметрів польових МОП-транзисторів

г) перелік позитивних якостей дипломного проекту У модернізованому тестері зменшено споживання струму в режимі сну (до 20 нА), що дозволяє пристрою працювати від автономного джерела живлення. Завдяки врахуванню зворотного струму колектора і використанню двох методів оцінки параметрів випробовуваних елементів, тестер дозволяє отримувати достовірні дані і уникати помилок у визначенні характеристик

д) основні недоліки дипломного проекту Не виконано докладного порівняння точності вимірювання транзисторів до та після модернізації тестеру;  
Варто було більш ґрунтовно описати процес вимірювання окремих параметрів транзисторів

Оцінка розрахункової частини Відмінно  
Оцінка графічної частини Добре  
Загальна оцінка Відмінно

Прізвище, ім'я, по батькові рецензента к.т.н. Рудніченко Микола Дмитрович

Місце роботи і посада рецензента Національний університет «Одеська політехніка»,  
доцент кафедри інформаційних технологій

Підпис

« 20



2025 р.

**ВІДГУК**

керівника на дипломний проект здобувача (здобувачки) освіти  
відділення комп'ютерних систем

*Янакі Олександра Романовича*

(прізвище, ім'я та по батькові)

Спеціальність: *123 "Комп'ютерна інженерія"*

Освітньо-професійна програма: *«Обслуговування комп'ютерних систем і мереж»*

Тема дипломного проекту: *Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері*

**ХАРАКТЕРИСТИКА ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ**

а) обсяг і якість виконання проекту (графічного матеріалу і розрахунково-пояснювальної записки) *Дипломний проект виконано відповідно технічному завданню. Пояснювальна записка містить 82 сторінок. У пояснювальній записці наведено етапи модернізації тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері. Графічна частина складається з 16 слайдів мультимедійної презентації, які також містять креслення, передбачені технічним завданням. Якість виконання пояснювальної записки та графічної частини добра, розробку виконано в повному обсязі.*

б) самостійність роботи над проектом: *Протягом всього строку дипломного проектування та переддипломної практики здобувач освіти Янакі О.Р. поступово та послідовно виконував всі етапи розробки. Всі роботи здобувач освіти виконував самостійно, з оглядом на рекомендації керівника*

в) теоретична підготовка випускника (випускниці): *Здобувач освіти Янакі О.Р. під час роботи над дипломним проектом вивчив достатню кількість літературних джерел та матеріалів за даною тематикою.*

*Вважаю, що теоретична підготовка дипломника добра і він готовий до захисту дипломного проекту*

г) вміння розв'язувати виробничі та конструкторські питання  
Під час дипломного проектування здобувач освіти Янакі О.Р. мав змогу  
самостійно приймати окремі рішення з реалізації схем пристрою та  
показав вміння організовано працювати над поставленим завданням,  
складати креслення та розрахунки за допомогою сучасних комп'ютерних  
програмних засобів та САПР, таких як Shem-Plan, National Instruments  
Multisim

Оцінка розрахункової частини	Відмінно
Оцінка графічної частини	Добре
Загальна оцінка	Відмінно

Прізвище, ім'я, по батькові керівника дипломного проекту

Шувалова Ірина Олегівна

Місце роботи і посада керівника дипломного проекту

ВСП "Одеський технічний фаховий коледж ОНТУ", викладач  
специдисциплін комісії комп'ютерних технологій та програмної інженерії

Підпис

«16» 06 2025 р.

**ДОЗВІЛ  
НА РОЗМІЩЕННЯ  
ВИПУСКНОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
(ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ)  
В ЕЛЕКТРОННОМУ РЕПОЗИТАРІЇ ВСП «ОТФК ОНТУ»**

Ми, що нижче підписалися,

**Янакі О.Р.**,  
здобувач освіти гр. 4КС-58, та

**Шувалова І.О.**,  
керівник дипломного проекту,

не заперечуємо щодо розміщення електронного варіанту пояснювальної записки до дипломного проекту фахового молодшого бакалавра на тему:

**«Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері» (автор роботи – Янакі О.Р., керівник роботи – Шувалова І.О.)**

виконаного у ВСП «Одеський технічний фаховий коледж Одеського національного технологічного університету» в 2025 році, у повному обсязі в електронному репозитарії ВСП «ОТФК ОНТУ» для вільного доступу через мережу Інтернет.

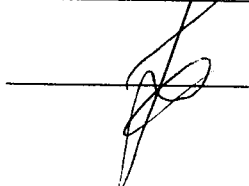
Несемо відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів випускної кваліфікаційної роботи і даємо згоду на обробку персональних даних.

Виконавець



/ Янакі О.Р. /

Керівник



/ Шувалова І.О. /

«16» червня 2025 р.


# ДОВІДКА

циклової комісії КТ та ПІ  
про допуск до захисту дипломного проєкту  
здобувача (здобувачки) освіти IV курсу  
відділення комп'ютерних систем групи 4КС-58

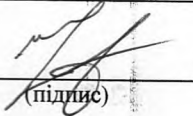
Янакі Олександра Романовича

на тему Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів  
на AVR-мікроконтролері

Висновок відповідальної особи за проведення нормоконтролю:  
пояснювальна записка до дипломного проєкту виконана з несуттєвими  
порушеннями ДСТУ та оформлена відповідно до вимог Положення про  
дипломне проєктування

 16.06.2025 Петрашова В.І.  
(підпис) (дата) (П.І.Б.)

Висновок відповідальної особи за перевірку роботи на наявність академічного  
плагиату згідно звіту про перевірку від 21.05.2025 р. значення коефіцієнту  
подібності в роботі становить 15,19%, коефіцієнт цитування – 0,49%.

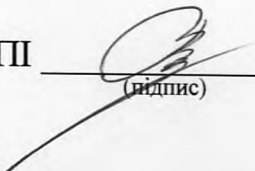
 16.06.2025 Краснокутська К.Г.  
(підпис) (дата) (П.І.Б.)

**Попередня експертиза (малий захист) дипломного проєкту**

здобувача (здобувачки) освіти Янакі О.Р.  
(П.І.Б.)

проведена « 16 » червня 2025 р.

Висновки Пояснювальна записка до дипломного проєкту виконана у повному  
обсязі. Випускна кваліфікаційна робота (дипломний проєкт) відповідає  
вимогам Положення про дипломне проєктування та рекомендована до  
захисту.

Голова ЦК КТ та ПІ   
(підпис)

Кривченко Ю.В.  
(П.І.Б.)

## Звіт подібності

### метадані

Назва організації

Odesa Technical Professional College of Odesa National University of Technology

Заголовок

Модернізація тестеру напівпровідникових транзисторів на AVR-мікроконтролері

Автор

Науковий керівник / Експерт

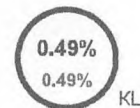
Янакі Олександр Романович Шувалова Ірина Олегівна

підрозділ

Відокремлений структурний підрозділ "Одеський технічний фаховий коледж Одеського національного технологічного університету"

### Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

14401

Кількість слів

118046

Кількість символів

### Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про **МОЖЛИВІ** маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		55
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		107

### Подібності за списком джерел

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

#### 10 найдовших фраз

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	Копір тексту
1	Вимірювач параметрів транзисторів 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	219 1.52 %
2	Вимірювач параметрів транзисторів 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	111 0.77 %

3	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/6cf43324-8f08-4031-ba42-f80b18efbbc8/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/6cf43324-8f08-4031-ba42-f80b18efbbc8/download</a>	46 0.32 %
4	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/6cf43324-8f08-4031-ba42-f80b18efbbc8/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/6cf43324-8f08-4031-ba42-f80b18efbbc8/download</a>	45 0.31 %
5	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/8999d5af-6274-44f4-ae78-d23e08048d38/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/8999d5af-6274-44f4-ae78-d23e08048d38/download</a>	44 0.31 %
6	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/8999d5af-6274-44f4-ae78-d23e08048d38/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/8999d5af-6274-44f4-ae78-d23e08048d38/download</a>	36 0.25 %
7	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/44c16132-5f53-48e2-b6c0-61e9a2f0fd75/content">https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/44c16132-5f53-48e2-b6c0-61e9a2f0fd75/content</a>	36 0.25 %
8	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c63b91ba-d04f-4715-890d-b16277695c7e/content">https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c63b91ba-d04f-4715-890d-b16277695c7e/content</a>	35 0.24 %
9	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/0e72a3b9-bdd7-4711-a3c6-dedc1d4287cc/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/0e72a3b9-bdd7-4711-a3c6-dedc1d4287cc/download</a>	34 0.24 %
10	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/5240e379-7721-49f0-8ee8-27140b0b473a/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/5240e379-7721-49f0-8ee8-27140b0b473a/download</a>	34 0.24 %

### з домашньої бази даних (0.00 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
------------------	-----------	--

### з програми обміну базами даних (3.52 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ЗАГОЛОВОК	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	Вимірювач параметрів транзисторів 3/15/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute)	497 (17) 3.45 %
2	192_Сидорін 8/19/2024 О.М.Бекетов National University of Urban Economy in Kharkiv (О.М.Бекетов National University of Urban Economy in Kharkiv)	10 (1) 0.07 %

### з Інтернету (11.67 %)

ПОРЯДКОВИЙ НОМЕР	ДЖЕРЕЛО URL	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/aed610a6-43ef-47e0-9066-e85c89456f3e/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/aed610a6-43ef-47e0-9066-e85c89456f3e/download</a>	604 (51) 4.19 %
2	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/1dff552d-7200-49b8-ae1d-ba76a1335685/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/1dff552d-7200-49b8-ae1d-ba76a1335685/download</a>	255 (22) 1.77 %
3	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/8999d5af-6274-44f4-ae78-d23e08048d38/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/8999d5af-6274-44f4-ae78-d23e08048d38/download</a>	193 (9) 1.34 %
4	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/0e72a3b9-bdd7-4711-a3c6-dedc1d4287cc/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/0e72a3b9-bdd7-4711-a3c6-dedc1d4287cc/download</a>	157 (11) 1.09 %
5	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/6cf43324-8f08-4031-ba42-f80b18efbbc8/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/6cf43324-8f08-4031-ba42-f80b18efbbc8/download</a>	111 (3) 0.77 %
6	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c63b91ba-d04f-4715-890d-b16277695c7e/content">https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c63b91ba-d04f-4715-890d-b16277695c7e/content</a>	81 (5) 0.56 %
7	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c5cd348b-fc64-4a25-9a5b-6cc8d62db909/content">https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/c5cd348b-fc64-4a25-9a5b-6cc8d62db909/content</a>	50 (3) 0.35 %
8	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/549ee9fe-7574-4ae5-b500-9fe2711f33e6/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/549ee9fe-7574-4ae5-b500-9fe2711f33e6/download</a>	41 (3) 0.28 %
9	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/44c16132-5f53-48e2-b6c0-61e9a2f0fd75/content">https://card-file.ontu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/44c16132-5f53-48e2-b6c0-61e9a2f0fd75/content</a>	36 (1) 0.25 %
10	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/5240e379-7721-49f0-8ee8-27140b0b473a/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/5240e379-7721-49f0-8ee8-27140b0b473a/download</a>	34 (1) 0.24 %
11	<a href="https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/82a6d375-2b69-4233-b80f-fbfd149b7747/download">https://card-file.ontu.edu.ua/bitstreams/82a6d375-2b69-4233-b80f-fbfd149b7747/download</a>	34 (3) 0.24 %

