

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

бакалавра

на тему: **Комп'ютеризована система вимірювання статичних параметрів діодів**

Виконав: студент 4 курсу, групи ЗМТ-22

Спеціальності: 152 «Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка»

Деркач Андрій Ігорович

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри ІВТ

кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Рецензент: _____

(науковий ступінь, вчене звання, посада, прізвище та ініціали)

Житомир – 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Спеціальність 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент _____ Деркач Андрій Ігорович

1. Тема роботи: Комп'ютеризована система вимірювання статичних параметрів діодів

Керівник роботи: доцент кафедри ІВТ кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

затверджена наказом по університету від « 06 » травня 2026 р. № 221/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 10 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт дослідження – комп'ютеризована система вимірювання статичних параметрів діодів, параметр вимірювання – статичні показники напівпровідникових діодів похибка виміру прямої напруги – $\pm 5 \%$; вимір прямої напруги виконується в діапазоні від 7 мВ до 1000В при завданні прямого струму в діапазоні від 13 нА до 1А; похибка виміру зворотної напруги – $\pm 10 \%$; вимір зворотної напруги виконується в діапазоні від 4 мВ до 1000В при завданні зворотного струму в діапазоні від 7 нА до 1 А.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці)

огляд та аналіз методів вимірювання статичних параметрів діодів, розробка структурної схеми, розробка алгоритму та програми роботи системи, розрахунок метрологічних характеристик, безпека життєдіяльності та охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень)
структурна схема, блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження технічного завдання	25.02.26 – 15.03.26	Виконано
2	Огляд та аналіз методів вимірювання статичних параметрів діодів	25.02.26 – 15.03.26	Виконано
3	Вибір засобів вимірювання статичних параметрів діодів	16.03.26 – 15.04.26	Виконано
4	Аналіз вимог до вимірювання статичних параметрів напівпровідникових приладів	16.04.26 – 24.04.26	Виконано
5	Розробка структурної схеми	25.04.26 – 09.05.26	Виконано
6	Розробка алгоритму та програми системи	10.05.26 – 24.05.26	Виконано
7	Розрахунок метрологічних характеристик	25.05.26 – 03.06.26	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	03.06.26– 17.06.26	Виконано

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Деркач А.І.

(прізвище та ініціали)

Чепюк Л. О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В даній кваліфікаційній роботі розроблено комп'ютеризовану систему вимірювання статичних параметрів діодів.

Дана система вимірювання статичних параметрів діодів дає можливість не тільки проводити вимірювання параметрів різних класів напівпровідникових діодів, але і при цьому візуально відображати їх основні статичні вольт-амперні характеристики. У ній передбачено можливість підключення до комп'ютера для автоматизації процесу тестування та спрощення документування результатів контролю.

Основною областю застосування системи є проведення вимірювань параметрів статичних напівпровідникових діодів, а також автоматичне відбракування напівпровідникових діодів за заданими параметрами.

Ключові слова: напівпровідниковий діод, вольт-амперна характеристика, статичні параметри діода, калібратор-мультиметр.

ABSTRACT

In this qualification work was developed a computerized system for measuring the static parameters of diodes was developed.

This system for measuring the static parameters of diodes allows not only to measure the parameters of various classes of semiconductor diodes, but also visually reflect their main static volt-ampere characteristics. It provides the possibility of connecting to a computer for automating the testing process and simplifying the documentation of control results.

The main area of application of the system is conducting measurements of static parameters of semiconductor diodes, as well as automatic rejection of semiconductor diodes according to specified parameters.

Keywords: semiconductor diode, volt-ampere characteristic, static parameters of the diode, calibrator-multimeter.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою в обсязі 73 сторінок формату А4, записка містить вступ, основну частину, що складає сім розділів, висновки, список використаних джерел та додатків. Темою роботи є розробка комп'ютеризованої системи для вимірювання статичних параметрів діодів.

Перший розділ містить основні завдання та вимоги до системи, а саме: умови експлуатації та технічні характеристики

Другий розділ містить загальний огляд напівпровідникових діодів, особливості вольт-амперної характеристики діодів та методи вимірювання параметрів вольт-амперної характеристики діодів.

Третій розділ містить огляд основних існуючих засобів вимірювань вольт-амперної характеристики та параметрів напівпровідникових діодів,.

Четвертий розділ містить опис складових частин та технічні характеристики системи на основі отриманих даних розроблено розробку структурної схеми комп'ютеризованої системи.

П'ятий розділ містить огляд розробленого алгоритмічного та програмного забезпечення комп'ютеризованої системи для вимірювання статичних параметрів діодів.

Шостий розділ містить розрахунок основних метрологічних характеристик системи для комп'ютеризованої системи для вимірювання статичних параметрів діодів.

У сьомому розділі розглянуті питання безпеки життєдіяльності та охорони праці.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
1.ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	10
1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування	10
1.2. Умови експлуатації.....	10
1.3. Вимоги до технічних характеристик.....	10
1.4. Вимоги до надійності.....	10
1.5. Вимоги до конструктивного оформлення	10
2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ ТА ЇХ ВИМІРЮВАНІ ПАРАМЕТРИ	11
2.1. Напівпровідникові діоди	11
2.2.Вольт-амперна характеристика діода	12
2.3. Вимірювання параметрів вольт-амперної характеристики діодів.....	18
3. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДІВ ..	26
3.1. Засоби вимірювань вольт-амперної характеристики та параметрів напівпровідникових діодів	26
3.2. Основи вимірювання статичних параметрів напівпровідникових приладів.....	30
4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИМІРУ СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ	33
4.1. Складові частини та технічні характеристики системи.....	33
4.2. Призначення та принцип дії системи.....	39
4.3. Калібратори-мультиметри серії 2400 компанії Keithley	42
5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ	48
5.1. Алгоритм роботи системи.....	48
5.2. Алгоритми вимірювання статичних параметрів діодів	50
5.3. Перевірка програмного управління процесом виміру	55

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ					
Вим	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Комп'ютеризована система вимірювання статичних параметрів діодів Пояснювальна записка			Лім.	Лист	Листів
Розроб.		Деркач А.І.								
Перевір.		Чепюк Л.О.							6	73
Реценз.								Державний університет «Житомирська політехніка», гр. ЗМТ-22		
Н. Контр.		Чепюк Л.О.								
Затверд.		Подчашинський Ю								

6. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	58
6.1. Методика розрахунку похибки вимірювання електричних параметрів діодів.....	58
6.2 Методика розрахунку похибки виміру диференціального опору	62
7. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	66
7.1. Небезпека ураження електричним струмом.....	66
7.2 Небезпека виникнення пожежі	68
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТКИ	74

ВСТУП

Для фахівців у різних галузях електроніки відомо, що основні параметри більшості напівпровідникових діодів варіюються в досить широких межах від екземпляра до екземпляра навіть у рамках одного і того ж типоміналу і за близьких умов випробувань, не кажучи вже про зміну характеристик кожного екземпляра в реальних умовах експлуатації. Така нестабільність напівпровідникових діодів у процесі їх виробництва та експлуатації не дозволяє без вживання спеціальних заходів забезпечити високу повторюваність параметрів електронних пристроїв, у складі яких використовуються напівпровідникові вироби.

На практиці при розробці електронних схем проблему залежності параметрів виробу в цілому від параметрів напівпровідникових діодів, що використовуються в ньому, вдається вирішити шляхом введення деякої надмірності за кількістю активних і пасивних елементів для організації різного роду зворотних зв'язків. Тим не менш, існують області, в яких просто неможливо обійтися без спеціалізованих пристроїв для вимірювання параметрів напівпровідникових діодів та отримання вольт-амперної характеристики (ВАХ). Насамперед, вони вкрай необхідні в роботі відбракувальних ділянок з виробництва напівпровідникових діодів.

Перші системи жодної автоматизації не мали.

Таким чином, з'явилася виробнича необхідність у розробці системи вимірювання статичних параметрів діодів, яка дозволяла б не тільки проводити вимірювання параметрів різних класів напівпровідникових діодів, але і при цьому візуально відображати їх основні статичні ВАХ. При цьому необхідно, щоб у ній було передбачено можливість підключення до комп'ютера для автоматизації процесу тестування та спрощення документування результатів контролю.

Таким чином, об'єктом дослідження даної роботи є система вимірювання статичних параметрів діодів.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Предметом дослідження є статичні показники напівпровідникових діодів.

Мета роботи: розробка автоматизованої системи вимірювання статичних параметрів діодів різних класів.

Завдання дослідження:

1 Огляд існуючих методів вимірювання статичних параметрів напівпровідникових діодів.

2 Проектування автоматизованої системи виміру статичних параметрів діодів різних класів.

3 Розробка та тестування автоматизованої системи вимірювання статичних параметрів діодів різних класів.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування

Підставою для розробки є завдання на дипломне проектування.

Система призначена для статичних параметрів діодів різних класів.

Потрібно розробити структурну схему системи та вибрати елементну базу, розробити електричну принципову схему підключень системи вимірювання статичних параметрів діодів. Розробити алгоритмічне забезпечення та оцінити точність системи вимірювання.

Початок розробки – лютий 2026 р. Кінець розробки – червень 2026 року.

1.2. Умови експлуатації

1.2.1. Температура зовнішнього середовища від 0 до +45 °С

1.2.2. Відносна вологість не більше 80%

1.2.3. Атмосферний тиск 600-800 мм. рт. ст.

1.2.4. Хімічно активних речовин немає

1.2.5. Характер роботи неперервний

1.3. Вимоги до технічних характеристик

1.3.1. Об'єкт дослідження – система вимірювання статичних параметрів діодів

1.3.2. Параметр вимірювання – статичні параметри діодів.

1.3.3. Похибка виміру прямої напруги – $\pm 5\%$;

1.3.4. Вимір прямої напруги виконується в діапазоні від 7 мВ до 1000В при завданні прямого струму в діапазоні від 13 нА до 1А;

1.3.5. Похибка виміру зворотної напруги – $\pm 10\%$;

1.3.6. Вимір зворотної напруги виконується в діапазоні від 4 мВ до 1000В при завданні зворотного струму в діапазоні від 7 нА до 1 А.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. НАПІВПРОВІДНИКОВІ ДІОДИ ТА ЇХ ВИМІРЮВАНІ ПАРАМЕТРИ

2.1. Напівпровідникові діоди

Напівпровідниковим діодом називають електроперетворювальний прилад, який, як правило, містить один електричний p - n перехід і два зовнішні виводи [1].

Усі напівпровідникові діоди можна поділити на дві групи: випрямні та спеціальні. Випрямні діоди, як випливає з назви, призначені для випрямлення змінного струму. Залежно від частоти і форми струму, що випрямляється, вони діляться на низькочастотні, високочастотні та імпульсні. У спеціальних напівпровідникових діодах використовуються різні властивості p - n переходів, такі як явище пробою, фотоефект, наявність ділянок ВАХ із негативним диференціальним опором та інші. Спеціальні напівпровідникові діоди знаходять, зокрема, застосування для стабілізації постійної напруги, реєстрації оптичного випромінювання, формування електричних сигналів.

Випрямні напівпровідникові діоди виготовляються, як правило, із кремнію, германію або арсеніду галію. За конструкцією випрямні напівпровідникові діоди поділяються на площинні та точкові, а залежно від технології виготовлення – на сплавні, дифузійні та епітаксійні. За значенням робочого струму I_{cp} вони поділяються на малопотужні ($I_{cp} < 0,3$ А), діоди середньої потужності ($0,3$ А $< I_{cp} < 10$ А) і силові діоди ($I_{cp} > 10$ А).

Площинні діоди мають велику площу p - n переходу і використовуються для випрямлення великих струмів. Точкові діоди мають малу площу p - n переходу і, відповідно, призначені для випрямлення малих струмів (до 30 мА).

Матеріалом для силових діодів зазвичай є кремній або арсенід галію. Сплавні діоди зазвичай використовують для випрямлення змінного струму з частотою до 5 кГц і виготовляються з кремнію. Крем'яні дифузійні діоди можуть працювати на підвищеній частоті до 100 кГц. Арсенід галієві випрямні діоди можуть використовуватися на частотах до кількох мегагерц

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

[2]. Найкращі частотні характеристики мають діоди з бар'єром Шоттки, здатні працювати на частотах до десятків ГГц.

Основою випрямного діода є напівпровідниковий монокристал з електричним переходом. Слабко легована область діода з низькою концентрацією домішкових атомів зазвичай має електронну провідність і має назву база.

Товщина бази значно більше високолегованої області з дірковою провідністю, що межує з нею, і має назву емітер [3].

До спеціальних напівпровідникових діодів відносяться прилади, в яких використовуються особливі властивості p - n переходів:

- керована напівпровідникова ємність – варикапи та варактори;
- зенерівський та лавинний пробій – стабілітрони;
- тунельний ефект – тунельні та звернені діоди;
- фотоефект – фотодіоди;
- фотонна рекомбінація носіїв зарядів – світлодіоди;
- багат шарові діоди –диністори.

Крім того, до діодів відносять деякі типи приладів з трьома виводами, такі як тиристори і двох базові діоди.

2.2. Вольт-амперна характеристика діода

Вольт-амперна характеристика p - n -переходу може бути представлена таким виразом [3]:

$$I = I_0(e^{\lambda U} - 1). \quad (2.1)$$

У реального діода послідовно з p - n переходом є опір основи r_6 . При великих прямих струмах падіння напруги на опорі бази можна порівняти з

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

падінням на переході. З урахуванням опору бази аналітичний вираз залежності струму діода від прикладеної до нього напруги може бути поданий в наступному вигляді:

$$I = I_0[e^{\lambda(U-Ir_\delta)} - 1], \quad (2.2)$$

$$\text{де } \lambda = \frac{q}{kT};$$

U – напруга, прикладена до діода;

r_δ – опір бази.

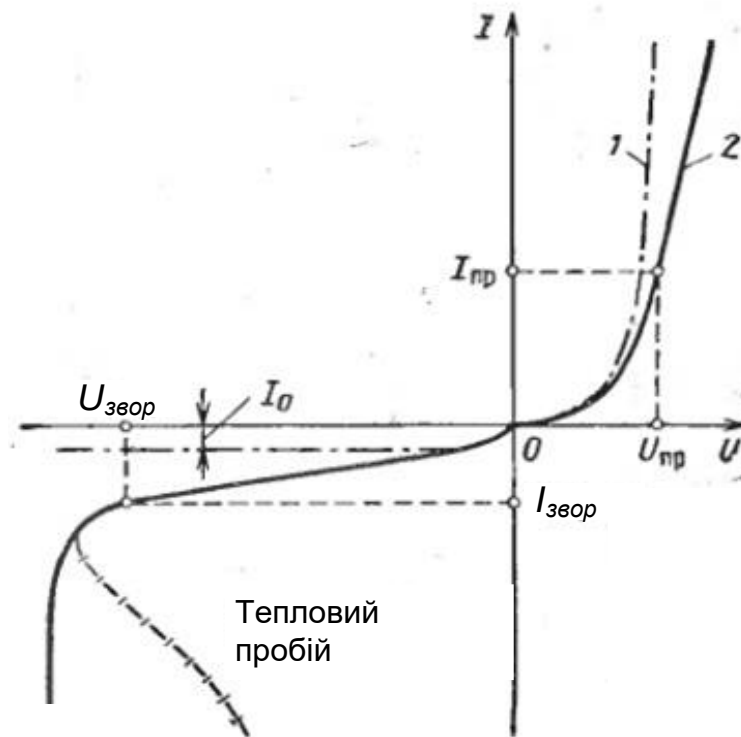
Провівши логарифмування та диференціювання виразу (2.2), визначимо диференціальний опір у будь-якій точці прямої гілки вольт-амперної характеристики:

$$R_d = \frac{du}{di} = \frac{1}{\lambda(I + I_0)} + r_\delta \quad (2.3)$$

З формули (2.3) слідує, що при малих струмах диференціальний опір залежить головним чином опору p - n переходу. При великих струмах диференціальний опір переходу малий і загальний опір визначається опором бази. Залежність струму від напруги є лінією, кут нахилу якої пропорційний величині r_δ .

Під час зняття вольт-амперних характеристик при великих значеннях струму не можна допускати підвищення температури діода. Нагрівання діода сильно впливає на його характеристику в області прямих струмів.

На рис. 2.1 показані вольт-амперні характеристики ідеалізованого p - n переходу та реального діода.



1 – ВАХ p - n переходу;

2 – ВАХ реального діода

Рис. 2.1. Вольт-амперні характеристики

Зворотний струм діода не має насичення, а збільшується зі зростанням зворотної напруги. Він складається із трьох компонентів: теплового струму, утвореного неосновними носіями, що виникають за межами переходу; струму термогенерації пар носіїв у сфері переходу; та струму витоку.

Величина зворотного струму залежить від навколишньої температури.

На зворотній гілці вольт-амперної характеристики при великих зворотних напругах є область швидкого наростання зворотного струму при незначному збільшенні зворотної напруги. Причиною цього є розвиток одного із видів пробою p - n переходу.

Пробоем p - n переходу називається явище різкого збільшення

зворотного струму при досягненні зворотною напругою певного критичного значення. Розрізняють електричний та тепловий *p-n* пробої.

Електричний пробій. Внаслідок малої ширини переходу ($\sim 10^4$ см) напруженість електричного поля в ньому досягає великої величини при порівняно невеликих напругах (одиниці або десятки вольт).

Існує два механізми електричного пробою: тунельний (його називають також зенерівським або польовим) та лавинний.

Тунельний пробій, в основі якого лежить квантово-механічний тунельний ефект, проявляється у тому, що під дією сильного електричного поля переходу відбувається емісія електронів із валентної зони до зони провідності. Цей ефект аналогічний так званій холодній емісії електронів із поверхні металу, що знаходиться у сильному електричному полі.

Воль-амперну характеристику в області тунельного пробою можна описати наближеним виразом

$$I_T \simeq I_0 e^{-\frac{AE_g^{3/2}}{E_{kp}}} \quad (2.4)$$

Таким чином, струм пробою залежить від напруженості електричного поля. Особливо інтенсивно струм зростає після напруги полем деякого критичного значення E_{kp} .

Використовуючи зв'язок між напруженістю поля в сплавному (різкому) переході та напругою на ньому, можна отримати залежність

$$U_T = \frac{E_{kp}^2 \epsilon_0 \epsilon}{2q\eta} = \frac{E_{kp}^2 \epsilon_0 \epsilon \mu \rho}{2} \quad (2.5)$$

Тут U_T – напруга тунельного пробою. Величина U_T обернено пропорційна концентрації основних носіїв заряду в базі діода (або прямо пропорційна величині питомого опору).

Використовуючи формули (2.4) і (2.5), можна записати вираз для диференціального опору переходу в області тунельного пробою

$$R_{\partial m} = \frac{BU_T}{I}, \quad (2.6)$$

де B – коефіцієнт, що враховує властивості матеріалу.

Зі збільшенням пробивного струму диференціальний опір падає.

Лавинний пробій полягає в тому, що під дією сильного електричного поля носії заряду, що потрапили в перехід (електрони або дірки), за час вільного пробігу між зіткненнями набувають енергію, достатню для іонізації атома. При цьому утворюється пара вільних носіїв заряду. У свою чергу, ці новостворені носії заряду, прискорюючись у полі, можуть також здійснити іонізацію.

Таким чином, повний струм через перехід I буде більшим, ніж струм I_0 , обумовлений потраплянням до нього електронів або дірок

$$I = MI_0 \quad (2.7)$$

Коефіцієнт M має назву коефіцієнт множення.

За деяких умов – високої напруженості поля та достатньої ширини переходу – величина $M \rightarrow \infty$: відбувається лавинний пробій переходу.

Коефіцієнт лавинного множення M може бути знайдений з наступного емпіричного співвідношення

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{л}}}\right)^n}, \quad (2.8)$$

де $U_{\text{л}}$ – напруга лавинного пробою.

Величина $U_{\text{л}}$ пов'язана з властивостями напівпровідникового матеріалу, з якого виготовлено перехід

$$U_{\text{л}} = m\rho^k. \quad (2.9)$$

Таким чином, в області лавинного пробою вольт-амперна характеристика переходу має вигляд

$$I = \frac{I_0}{1 - \left(\frac{U}{U_{\text{л}}}\right)^n} \quad (2.10)$$

Диференціальний опір в області лавинного пробою переходу дорівнює

$$R_{\text{дл}} = \frac{U_{\text{л}}}{nMI} \quad (2.11)$$

Тепловий пробій. Тепловий пробій p - n переходу виникає внаслідок втрати стійкості теплового режиму роботи. При збільшенні прикладеної до переходу зворотної напруги потужність, що розсіюється на ньому, зростає. Це призводить до підвищення температури переходу та сусідніх з ним областей напівпровідника. У свою чергу, збільшення температури призводить до підвищення зворотного струму переходу і потужності, що розсіюється. Таким чином, виникає своєрідний теплоелектричний зворотний зв'язок між величиною струму та температурою p - n переходу.

Характерною ознакою теплового пробою є наявність на вольт-амперній характеристиці переходу при великих зворотніх напругах ділянки з негативним диференціальним опором.

Особливістю пробою переходу є його локалізація у деяких слабких місцях переходу. Температура цих ділянок може значно перевищувати середню по всій площині переходу. У цих ділянках, отже, найімовірніше виникає руйнація переходу внаслідок перегріву.

Враховуючи перелічені вище особливості вольт-амперної характеристики, в технічних умовах на діоди в якості електричних параметрів задають координати її точок на прямій та зворотній гілках.

Параметри діода, що характеризують пряму гілку:

$U_{пр}$ – пряме падіння напруги на діоді при заданій величині постійного прямого струму $I_{пр}$.

R_d – диференціальний опір – відношення збільшення напруги на діоді до малого приросту струму, що викликав його, через діод.

Параметри діода, що характеризують зворотню гілку:

$U_{звор}$ – постійна зворотна напруга на діоді при заданій величині постійного зворотного струму, що протікає через діод;

$I_{звор}$ – постійний зворотний струм, що протікає через діод при подачі на нього постійної зворотної напруги $U_{звор}$.

2.3. Вимірювання параметрів вольт-амперної характеристики діодів

Вибір режиму виміру. На вольт-амперній характеристиці діода є області з різними диференціальними опорами. Тому необхідна точність визначення параметрів може бути досягнута за дотримання певних умов вимірювання. З'ясуємо, які ці умови при вимірі прямої характеристики діода. Логарифмуючи вираз (2.2), отримаємо

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

$$U = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) + I r_{\sigma} \quad (2.12)$$

На підставі формул (2.3) і (2.12) можна одержати вираз, що зв'язує відносну зміну напруги на діоді, з відносною зміною прямого струму, що його викликає.

$$\left(\frac{\Delta U}{U} \right)_{\text{пр}} = \frac{\frac{1}{1 + \frac{I_0}{I}} + \lambda I r_{\sigma}}{\ln \left(1 + \frac{I_0}{I} \right) + \lambda I r_{\sigma}} \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\text{пр}} \quad (2.13)$$

Оскільки справедлива нерівність

$$\ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) \gg 1$$

при струмі більше 1 мА, то перший множник у формулі (2.13) значно менше одиниці. Так, вважаючи $I = 1$ мА, $I_0 = 10$ мкА, $r_{\sigma} = 10$ Ом, отримуємо

$$\left(\frac{\Delta U}{U} \right)_{\text{пр}} = 0,28 \left(\frac{\Delta I}{I} \right)_{\text{пр}}.$$

Якщо опір бази малий, точність виміру напруги буде вищою, ніж струму, при однакових відносних похибках виміру цих величин. Тому при оцінці параметрів прямої гілки вольт-амперної характеристики доцільно задавати постійний прямий струм $I_{\text{пр}}$ та вимірювати пряме падіння напруги $U_{\text{пр}}$. Вимога задавати струм через діод означає, що внутрішній опір джерела живлення має бути суттєво більше опору діода, щоб зміна напруги на діоді не викликала змін струму, які виходять за межі заданої похибки вимірювань, тобто, джерело має бути генератором струму по відношенню до діода. Така

умова поширюється на вимірювання напруги у всіх ділянках характеристики, де малий диференціальний опір. Так, при вимірі параметрів діода в області пробою слід задаватися величиною зворотного струму $I_{\text{звор}}$ і визначати зворотну напругу $U_{\text{звор}}$.

Умова, якій має задовольняти внутрішній опір генератора постійного струму, визначається співвідношенням

$$R_i \geq \frac{\Delta R_d}{\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{пр}}} + R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} + R_d \quad (2.14)$$

де ΔR_d – можливе відхилення величини диференціального опору діода;

ΔU – максимальне можливе відхилення величини прямого падіння напруги на діоді при заданій величині струму $I_{\text{пр}}$;

$\left(\frac{\Delta I}{I}\right)_{\text{пр}}$ – допустима відносна похибка вимірювання постійного прямого струму, що протікає через діод.

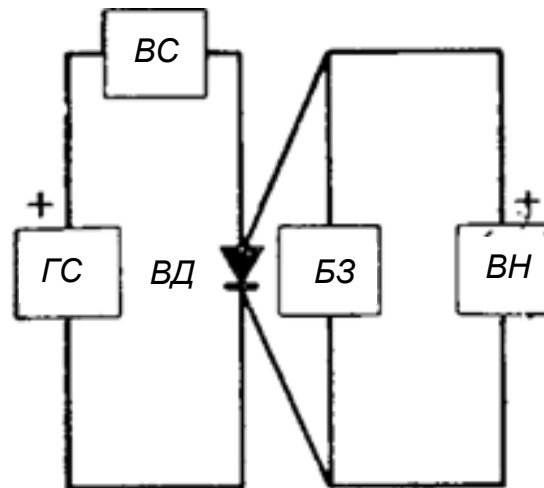
При вимірюванні параметрів зворотної характеристики діода, за винятком області пробою, необхідно, щоб джерело живлення, яким задається режим вимірювання, мало внутрішній опір, так як в іншому випадку незначні зміни зворотного струму будуть викликати великі похибки при вимірюванні зворотної напруги.

Вимірювання параметрів прямої гілки характеристики діода. Для вимірювання прямого падіння напруги на діоді застосовують схему включення, зображену рис. 2.2.

Генератор постійного струму (ГС) повинен забезпечувати сталість прямого струму діода (без підстроювання) за різних значень прямого падіння напруги на діоді. Вимірювання прямого струму при закорочуванні діода не

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

повинно перевищувати 3% від номінального значення. Постійна пряма напруга на діоді вимірюється вольтметром (ВН). Блок захисту (БЗ) запобігає навантаженню вольтметра при відключенні вимірюваного діода. Постійний прямий струм вимірюється міліамперметром (ВС).



ГС – генератор струму; ВС – вимірювач струму; БЗ – блок захисту;
ВН – вимірювач напруги; ВД – випробуваний діод.

Рис. 2.2. Блок-схема вимірювання прямого падіння напруги на діоді

Похибка, з якою визначається величина прямого струму діода, включаючи похибку його вимірювання та помилку, викликану споживанням вольтметра і блоку захисту, не повинна перевищувати $\pm 3\%$.

Падіння напруги на контактній системі та у проводах, за допомогою яких випробуваний діод підключається до вимірювальної схеми, не повинно перевищувати $\pm 2\%$ від максимально можливої величини прямого падіння напруги на діоді.

Вольтметр постійного струму повинен забезпечувати вимірювання величини $U_{пр}$ із похибкою не більше $\pm 1\%$. Для цього застосовуються магнітоелектричні прилади класу точності 1,0.

Величина струму, що відгалужується у вольтметр, має перевищувати $5 \times 10^{-3} I_{\text{пр}}$.

В якості генератору струму (ГС) можуть бути використані батарея або стабілізатор напруги з послідовно включеними додатковими опорами, щоб виконувати вимоги формули (2.14).

Розглянемо схему виміру прямого диференціального опору діода (рис. 2.3).

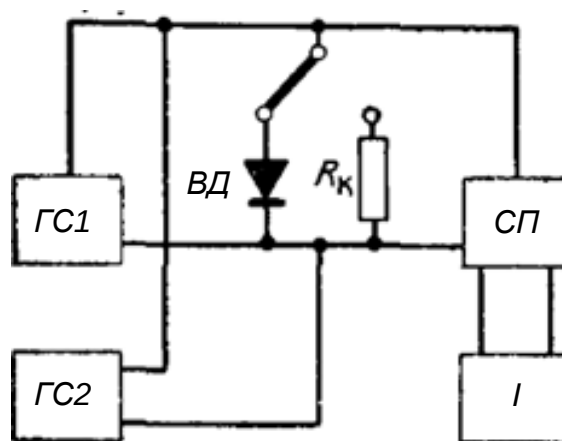


Рис. 2.3. Блок-схема вимірювання диференціального опору

На діод подається постійна напруга від генератора струму (ГС1) та змінна напруга від генератора (ГС2). Величина постійного струму повинна відповідати робочій точці на прямій гілці вольт-амперної характеристики, в якій вимірюється диференціальний опір (цей струм називається струмом зміщення). Амплітуда змінного струму повинна становити не більше 1-2 % від величини струму зміщення, оскільки при великій амплітуді результат вимірювання не відповідатиме дійсному значенню диференціального опору діода. Змінна напруга (синусоїдальної форми), прикладена до діода (ВД), подається на вхід селективного підсилювача СП і контролюється стрілочним індикатором І.

При постійній амплітуді змінного струму падіння напруги змінної складової на діоді буде пропорційно диференційному опору. Тому шкалу індикатора можна відградувати в одиницях опору за допомогою еталонного резистора R_k .

Вимірювання параметрів зворотної гілки характеристики діода.

Схема включення діода при вимірі зворотного струму $I_{\text{звор}}$ зображена на рис. 2.4. Від генератора постійної напруги (ГН) на випробуваний діод ВД подається задана величина зворотної напруги. Значення зворотної напруги контролюється вольтметром ІН.

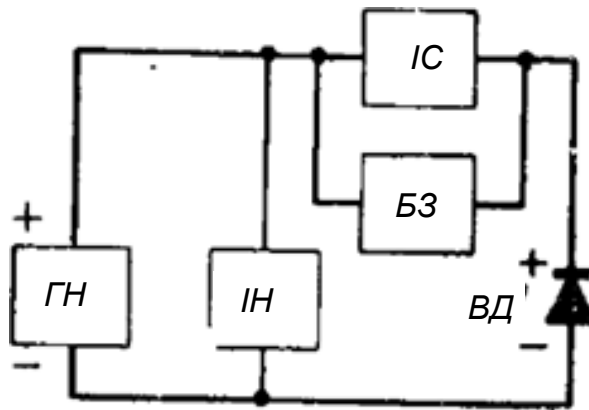


Рис. 2.4. Схема вимірювання зворотного струму

Зворотний струм діода вимірюється мікроамперметром ІС. Вхідний опір генератора постійної напруги має бути досить малим, оскільки вихідна напруга ГН не повинна змінюватися більш ніж на 1 % при зміні величини від нуля до максимального (для випробуваного діода) значення. Вольтметр включають до вимірювача струму та його блоку захисту БЗ. Тому падіння напруги на вимірнику струму і струмонесучих елементах схеми захисту не повинно перевищувати 2 % від величини зворотної напруги, що встановлюється. Якщо генератор напруги живиться від мережі, то пульсації на його виході не повинні перевищувати 1 % від вихідної напруги.

Для вимірювання постійної зворотної напруги на діоді $U_{\text{звор}}$ при заданій величині зворотного струму $I_{\text{звор}}$ використовується схема, зображена на рис. 2.5. У цій схемі діод ВД, що випробовується, через мікро амперметр ІС підключений до генератора постійного струму ГС. Падіння напруги на діоді, викликане зворотним струмом $I_{\text{звор}}$, вимірюється високо омним вольтметром ІН.

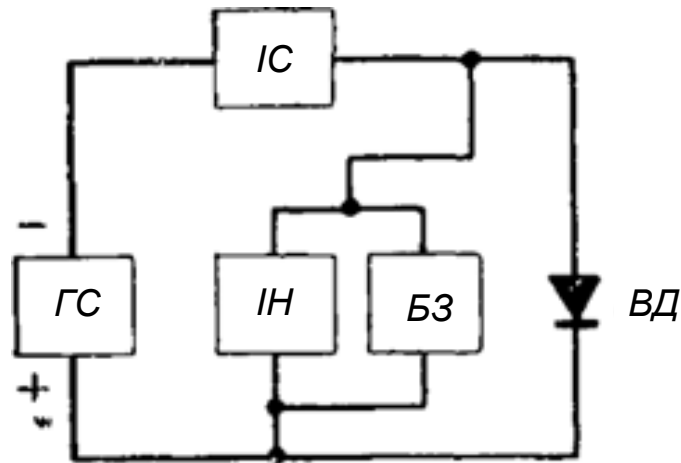


Рис. 2.5. Блок-схема вимірювання зворотної напруги

Вихідний опір генератора постійного струму ГС має бути таким, щоб при всіх допустимих значеннях зворотної напруги вихідний струм генератора змінювався не більше ніж на 5 %. Для вимірювання падіння напруги можна використовувати електростатичні вольтметри класу точності 2,5. Схема генератора постійного струму для вимірювання зворотної напруги аналогічна пропорційній схемі генератора постійного струму і відрізняється від неї лише тим, що в ній замість транзистора використовується вакуумний тетрод, а діод, що випробовується, і опорний стабілітрон включені в зворотній полярності.

При використанні діодів у ключових і логічних пристроях, в ланцюгах постійного струму важливо знати такі основні статичні параметри як пряме

падіння напруги $U_{\text{пр}}$ і постійний зворотний струм $I_{\text{звор}}$. У технічних умовах на діоди в якості статичних параметрів задають координати точок вольт-амперної характеристики на прямий і зворотних гілках.

Повний список загальних параметрів діодів та їх прийнятих позначень наведено у додатку А.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

3. ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДІОДІВ

При статичних вимірах значення вимірюваної величини протягом часу виміру вимірювального засобу є незмінним. Статичними є ручні вимірювання, а також автоматичні вимірювання при дуже низькій швидкості безперервної зміни значень, що задаються, ЕРС (струму) або при великій тривалості сходинок у разі їх ступінчасто-безперервної зміни. Статичні вимірювання забезпечують високу точність через відсутність складової похибки, обумовленої зміною вимірюваної величини під час вимірювання (динамічної похибки), але вимагають досить багато часу на вимір ВАХ.

Однак, при виборі способу вимірювання необхідно враховувати особливість напівпровідникового приладу як об'єкта вимірювання. Вона полягає в тому, що навіть при незмінних значеннях прикладених до нього ЕРС або струму його вимірювані струми і напруги змінюються в часі за рахунок зміни температури кристала, яка залежить від потужності, що розсіюється кристалом, і часу прикладання заданого впливу. При великому часі вимірювання, що властивий для статичних вимірювань, зміна температури кристала є значною і призводить до великих спотворень вимірюваної ВАХ.

3.1. Засоби вимірювань вольт-амперної характеристики та параметрів напівпровідникових діодів

Призначення установки. Установка призначена для вимірювання параметрів вольт-амперної характеристики напівпровідникових приладів:

- вимір зворотного струму;
- вимірювання зворотної напруги;
- вимір прямої напруги;
- вимір диференціального опору;

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

– автоматичного відбракування діода за заданими параметрами.

Відповідно до міжнародних стандартів було розроблено технічне завдання. Вимірювальний комплекс повинен забезпечувати:

- ручне та автоматичне визначення полярності діода;
- вимір прямої напруги проводиться після вимірювання зворотної напруги;
- передбачити виведення результатів вимірювання на екран ПК та їх збереження у текстовому файлі з позначенням виробу, заданих та вимірних параметрів, виведення отриманого файлу на друк з можливістю експорту до EXEL;
- вимір прямої напруги виконується відповідно до вимог ДСТУ ІЕС 60747-2:2015. Похибка виміру має виходити межі $\pm 5 \%$;
- вимір прямої напруги виконується в діапазоні від 7 мВ до 1000В при завданні прямого струму в діапазоні від 13 нА до 1 А;
- вимір прямої напруги виконується в діапазоні від 7 мВ до 100 В при завданні прямого струму в діапазоні від 41 нА до 3 А;
- вимірювання зворотної напруги виконується з похибкою не більше $\pm 10 \%$;
- вимірювання зворотної напруги виконується в діапазоні від 4 мВ до 1000В при завданні зворотного струму в діапазоні від 7 нА до 1 А;
- вимірювання зворотної напруги виконується в діапазоні від 4 мВ до 100 В при завданні зворотного струму в діапазоні від 21 нА до 3 А;
- вимірювання зворотного струму виконується відповідно до вимог ДСТУ ІЕС 60747-2:2015. Основна похибка методу вимірювання постійного зворотного струму має виходити межі $\pm 10\%$;
- вимір зворотного струму виконується в діапазоні від 4 нА до 1 А при завданні зворотної напруги від 7 мВ до 1000 В;
- вимірювання зворотного струму виконується в діапазоні від 8 нА до 3 А при завданні зворотної напруги від 7 мВ до 100 В.

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вибір обладнання. У мікроелектроніці та в нанотехнологіях необхідні найрізноманітніші прилади для вимірювання постійних та змінних струмів та напруг, параметрів пасивних та активних компонентів, забезпечення електроживлення пристроїв на них. В англomовній літературі всі досліджувані компоненти та пристрої прийнято називати скороченою назвою DUT (device under test), тобто пристрої, що тестуються. Для мікроелектроніки та нанотехнологій характерний як відносно повільний дрейф результатів вимірювань у ході тестування, так і швидкий дрейф, спричинений шумами. Це змушує ускладнювати прилади для тестування пристроїв і вводити нові методи вимірювання, наприклад імпульсні, з автоматичною корекцією нуля. Зрозуміло, у світі є безліч фірм, зайнятих розробкою та серійним виробництвом таких приладів. На особливий інтерес заслуговує досвід розробки комплексу приладів та вимірювальних систем компанії Keithley Inc. - однією з компаній, що має великий досвід у розробці таких засобів для напівпровідникового та мікроелектронного виробництва, а останніми роками та для виробництва у сфері нанотехнологій. Огляд продукції цієї фірми дозволяє краще формувати висновки про специфіку забезпечення вимірювальними приладами загального призначення сучасного напівпровідникового і мікроелектронного виробництва. Його можна використовувати і для оцінки приладів, які випускають інші фірми.

На рис. 3.1 наведено загальну функціональну схему комбінованих приладів компанії Keithley для вимірювань на постійному струмі. У загальному випадку прилад складається з джерел напруги V і струму I з цифровим завданням номіналів і цифрових вимірювачів напруги V_{meter} і струму I_{meter} .

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

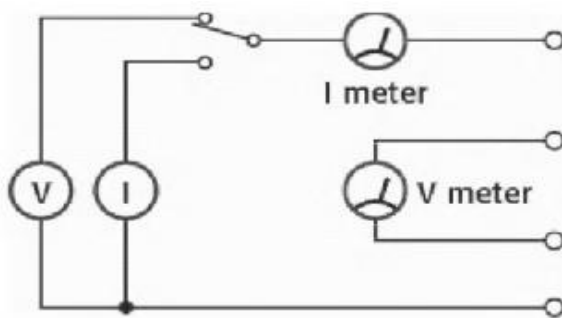
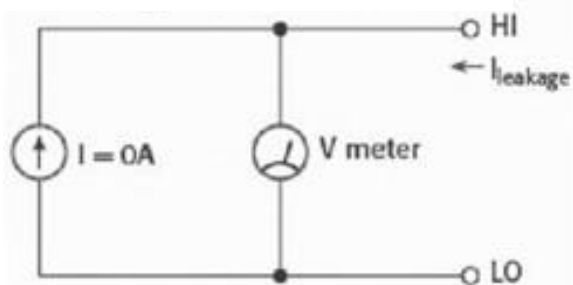


Рис. 3.1 Узагальнена функціональна схема комбінованого приладу компанії Keithley

Вони можуть бути як постійного, так і змінного струму. Із функціональної схеми (рис. 3.1) можна отримати різні варіанти вимірювальних схем. Наприклад, на рис. 3.2 показана конфігурація для вольтметра і амперметра.

Конфігурація для вольтметра



Конфігурація для амперметра

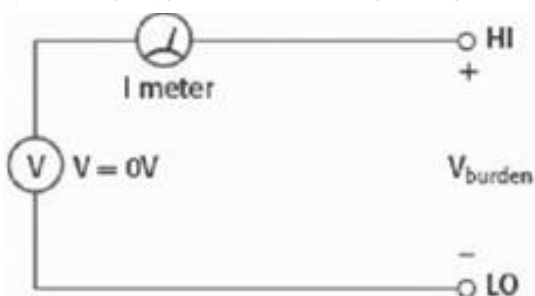


Рис. 3.2. Конфігурації вольтметра та амперметра на базі приладу, що має вимірювач струму та напруги

Високовольтні джерела живлення/вимірювачі

Велика серія високовольтних джерел/вимірників 24** із вбудованими вимірювачами напруги та струму має великі області застосування у виробництві напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем.

Ця серія має вбудований багатофункціональний мультиметр, що вимірює напруги, струми та опори в широких межах. Технічні характеристики цих серій джерел живлення серій 24 представлені в додатку Б.

Окрім потужності, що віддається у навантаження, ці прилади відрізняються своїми функціональними можливостями. Наприклад, у серії є високовольтне джерело з вихідною напругою до 1000 (2410).

3.2. Основи вимірювання статичних параметрів напівпровідникових приладів

У межах кожного класу приладів можуть знадобитися вимірювання статичних параметрів на постійному струмі (наприклад, сімейств вхідних та вихідних ВАХ, передавальних характеристик тощо). Все це вимагає різноманітної апаратури та методик вимірювань.

Кількість напівпровідникових приладів нині дуже велика. Досить відзначити, що тільки діодів є не один десяток принципово різних типів, наприклад: випрямні діоди малої, середньої та великої потужності, кремнієві стабілітрони, високочастотні та імпульсні діоди, варикапи (діоди зі змінною напругою ємністю), звичайні та лавинні фотодіоди, лавинно-прольотні діоди, високошвидкісні діоди Шотткі, змішувальні та параметричні діоди, діоди з накопиченням заряду, тунельні діоди і т. п. Тестування кожного типу діода має свої нюанси та вимагає розробки своєї вимірювальної апаратури. Однак є безліч завдань тестування, загальних для тих чи інших приладів. Розглянемо саме такі завдання та засоби їх вирішення.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найпростіша схема тестування діода показана на рис. 3.3. Вона дозволяє зняти ВАХ діода $I(U)$, використовуючи 4-точкову вимірювальну схему (в окремих випадках можливий вимір і за 2-точковою схемою).

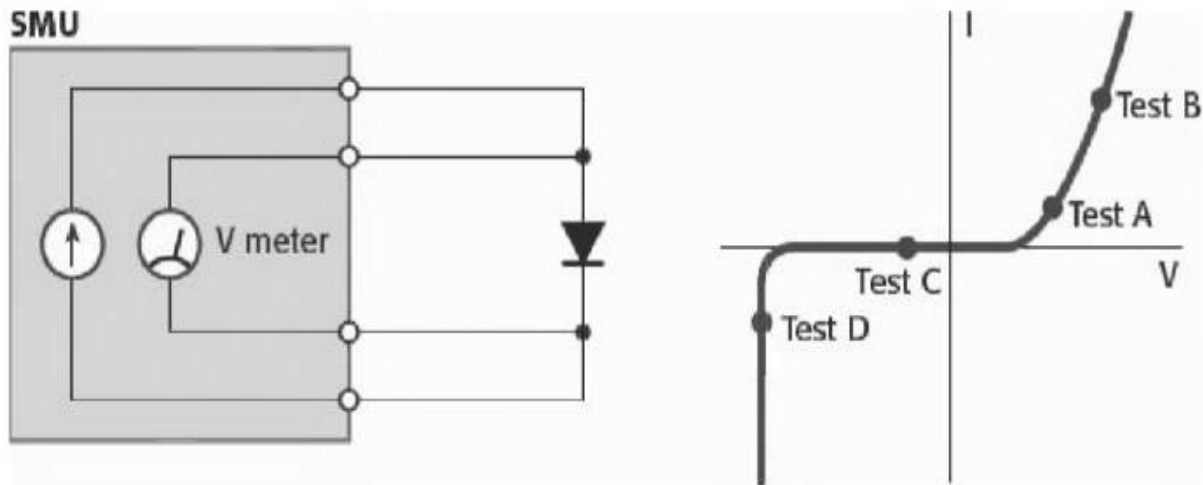


Рис. 3.3 Основна схема для вимірювання та тестування статичної ВАХ напівпровідникового діода

При промисловому контролі діодів часто обмежуються 3 – 4 тестами, як показано на рис. 3.3 справа. Тести А і В дозволяють судити про роботу діода в прямому включенні (напрямку), а тести С і D – у зворотному напрямку. При цьому тест А визначає падіння напруги на діодів області великих прямих струмів, а тест В – в області малих прямих струмів, поблизу області відкриття діодів. Тест С дозволяє оцінити зворотний струм закритого діода, а тест D – наявність ділянки пробою.

Лінійні джерела/вимірники серії 2400. Для проведення вимірювань статичних параметрів напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем необхідно мати дуже велику кількість вимірювальних приладів з великим діапазоном зміни потрібних параметрів. Фірма Keithley – один із лідерів у розробці таких приладів. Вона створила невелику кількість приладів, але з унікально широким діапазоном вихідних струмів та напруг,

що перекриває потреби у випробуванні більшості напівпровідникових діодів. Прилади мають єдине програмне керування їх вихідними параметрами та вимірюваними величинами. Завдяки стандартним інтерфейсам GPIB, LAN, RS-232 та ін. прилади можуть легко поєднуватися для створення типових вимірювальних систем будь-якої складності. Це полегшується наявністю різних аксесуарів.

Прилади характеризуються такими параметрами (характеристиками):

- діапазон вихідних струмів від 10 пА до 10 А;
- діапазон вихідних напруг від 1 мкВ до 1100 В;
- максимальні вихідні потужності від 20 до 1000 Вт;
- робота без перемикань у всіх 4 квадрантах;
- базова похибка 0,012% та розрядність дисплея 5 1/2;
- 6-точкова схема вимірювання опорів із застосуванням програмованих джерел напруги та струму;
- до 1700 вимірювань за секунду при розрядності 4 1/2;
- Вбудований компаратор для швидкого тестування типу «вірно – помилка»;
- драйвери для програм TestPoint та LabView.

В основному, ці прилади розраховані на вимірювання параметрів напівпровідникових приладів у статичному режимі роботи.

4. РОЗРОБКА СИСТЕМИ ВИМІРУ СТАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

4.1. Складові частини та технічні характеристики системи

Склад системи вимірювання статичних параметрів діодів наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Склад системи вимірювання статичних параметрів діодів

Позначення та найменування складової частини	Кількість, шт.
ПК	1
Калібратор-мультиметр цифровий 2410 (2425)	1
Перетворювач GPIB-USBKUSB-488B	1
Перетворювач COM-USB	1
Пристрій контактний	1
Адаптер	1
Програма AXIXD_U605	1

Технічні характеристики системи з використанням калібратора-мультиметра цифрового 2410

Система забезпечує:

– похибка та дозвіл завдання напруги наведені в таблиці 4.2;

Таблиця 4. 2. Похибка та дозвіл завдання напруги

Верхня межа діапазону завдання напруги	Програмована роздільна здатність	Межі основної відносної похибки, %
200,000 мВ	5 мкВ	$\pm(0,02 + 0,3 \cdot (200 \cdot 10^{-3} / U_{out}))$
2,000000 В	50 мкВ	$\pm(0,02 + 0,03 \cdot (2 / U_{out}))$
20,0000 В	500 мкВ	$\pm(0,02 + 0,012 \cdot (20 / U_{out}))$
1000,00 В	50 мВ	$\pm(0,02 + 0,01 \cdot (1000 / U_{out}))$
<i>Примітка – U_{out} – задане значення напруги</i>		

– похибка та дозвіл завдання прямого та зворотних струмів наведені в таблиці 4.3;

Таблиця 4.3. Похибка та дозвіл завдання прямого та зворотних струмів

Верхня межа діапазону завдання струму	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
1,00000 мкА	50 пА	$\pm(0,035 + 0,06 \cdot (1 \cdot 10^{-6}/I_{out}))$
10,0000 мкА	500 пА	$\pm(0,033 + 0,02 \cdot (10 \cdot 10^{-6}/I_{out}))$
100,000 мкА	5 нА	$\pm(0,031 + 0,02 \cdot (100 \cdot 10^{-6}/I_{out}))$
1,00000 мА	50 нА	$\pm(0,034 + 0,02 \cdot (1 \cdot 10^{-3}/I_{out}))$
20,0000 мА	500 нА	$\pm(0,045 + 0,02 \cdot (20 \cdot 10^{-3}/I_{out}))$
100,000 мА	5 мкА	$\pm(0,066 + 0,02 \cdot (100 \cdot 10^{-3}/I_{out}))$
1,00000 А	50 мкА	$\pm(0,27 + 0,09 \cdot (1/I_{out}))$
<i>Примітка</i> – I_{out} – задане значення струму		

– похибка та дозвіл вимірювання напруги наведені в таблиці 4.4;

Таблиця 4.4. Похибка та дозвіл вимірювання напруги

Верхня межа діапазону завдання напруги	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
200,000 мВ	1 мкВ	$\pm(0,012 + 0,15 \cdot (200 \cdot 10^{-3}/U_{in}))$
2,000000 В	10 мкВ	$\pm(0,012 + 0,015 \cdot (2/U_{in}))$
20,0000 В	100 мкВ	$\pm(0,015 + 0,0075 \cdot (20/U_{in}))$
1000,00 В	10 мВ	$\pm(0,015 + 0,005 \cdot (1000/U_{in}))$
<i>Примітка</i> – U_{out} – виміряне значення напруги		

– похибка та дозвіл вимірювання струму наведені в таблиці 4.5;

Таблиця 4.5. Похибка та дозвіл вимірювання струму

Верхня межа діапазону вимірювання струму	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
1,00000 мкА	10 пА	$\pm(0,029 + 0,03 \cdot (1 \cdot 10^{-6}/I_{in}))$
10,0000 мкА	100 пА	$\pm(0,027 + 0,007 \cdot (10 \cdot 10^{-6}/I_{in}))$
100,000 мкА	1 нА	$\pm(0,025 + 0,006 \cdot (100 \cdot 10^{-6}/I_{in}))$
1,00000 мА	10 нА	$\pm(0,027 + 0,006 \cdot (1 \cdot 10^{-3}/I_{in}))$
20,0000 мА	100 нА	$\pm(0,035 + 0,006 \cdot (20 \cdot 10^{-3}/I_{in}))$
100,000 мА	1 мкА	$\pm(0,055 + 0,006 \cdot (100 \cdot 10^{-3}/I_{in}))$
1,00000 А	10 мкА	$\pm(0,22 + 0,057 \cdot (1/I_{in}))$
<i>Примітка</i> – I_{out} – виміряне значення струму		

Технічні характеристики системи з використанням калібратора-мультиметра цифрового 2425

Система забезпечує:

– похибка та дозвіл завдання напруги наведені в таблиці 4.6;

Таблиця 4.6. Похибка та дозвіл завдання напруги

Верхня межа діапазону завдання напруги	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
200,000 мВ	5 мкВ	$\pm(0,02 + 0,3 \cdot (200 \cdot 10^{-3}/U_{out}))$
2,000000 В	50 мкВ	$\pm(0,02 + 0,03 \cdot (2/U_{out}))$
20,0000 В	500 мкВ	$\pm(0,02 + 0,012 \cdot (20/U_{out}))$
1000,00 В	2,5 мВ	$\pm(0,02 + 0,012 \cdot (100/U_{out}))$
<i>Примітка</i> – U_{out} – задане значення напруги		

– похибка та дозвіл завдання струму наведені в таблиці 4.7;

Таблиця 4.7. Похибка та дозвіл завдання струму

Верхня межа діапазону завдання струму	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
10,0000 мкА	500 пА	$\pm(0,033 + 0,02 \cdot (10 \cdot 10^{-6}/I_{out}))$
100,000 мкА	5 нА	$\pm(0,031 + 0,02 \cdot (100 \cdot 10^{-6}/I_{out}))$
1,00000 мА	50 нА	$\pm(0,034 + 0,02 \cdot (1 \cdot 10^{-3}/I_{out}))$
10,0000 мА	500 нА	$\pm(0,045 + 0,02 \cdot (10 \cdot 10^{-3}/I_{out}))$
100,00 мА	5 мкА	$\pm(0,066 + 0,02 \cdot (100 \cdot 10^{-3}/I_{out}))$
1,00000 А	50 мкА	$\pm(0,067 + 0,09 \cdot (1/I_{out}))$
3,00000 А	150 мкА	$\pm(0,059 + 0,09 \cdot (3/I_{out}))$
<i>Примітка</i> – I_{out} – задане значення струму		

– похибка та дозвіл вимірювання напруги наведені в таблиці 4.8;

Таблиця 4.8. Похибка та дозвіл вимірювання напруги

Верхня межа діапазону вимірювання напруги	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
200,000 мВ	1 мкВ	$\pm(0,012 + 0,15 \cdot (200 \cdot 10^{-3}/U_{in}))$
2,00000 В	10 мкВ	$\pm(0,012 + 0,015 \cdot (2/U_{in}))$
20,0000 В	100 мкВ	$\pm(0,015 + 0,0075 \cdot (20/U_{in}))$
100,000 В	1 мВ	$\pm(0,015 + 0,005 \cdot (100/U_{in}))$
<i>Примітка</i> – U_{out} – виміряне значення напруги		

– похибка та дозвіл вимірювання струму наведені в таблиці 4.9;

Таблиця 4.9. Похибка та дозвіл вимірювання струму

Верхня межа діапазону завдання струму	Програмований дозвіл	Межі основної відносної похибки, %
10,0000 мкА	100 пА	$\pm(0,027 + 0,007 \cdot (10 \cdot 10^{-6}/I_{in}))$
100,000 мкА	1 нА	$\pm(0,025 + 0,006 \cdot (100 \cdot 10^{-6}/I_{in}))$
1,00000 мА	10 нА	$\pm(0,027 + 0,006 \cdot (1 \cdot 10^{-3}/I_{in}))$
10,0000 мА	100 нА	$\pm(0,035 + 0,006 \cdot (10 \cdot 10^{-3}/I_{in}))$
100,00 мА	1 мкА	$\pm(0,055 + 0,006 \cdot (100 \cdot 10^{-3}/I_{in}))$
1,00000 А	10 мкА	$\pm(0,06 + 0,057 \cdot (1/I_{in}))$
3,00000 А	10 мкА	$\pm(0,052 + 0,057 \cdot (3/I_{in}))$
<i>Примітка</i> – I_{out} – виміряне значення струму		

Відповідно до ДСТУ ІЕС 60747-2:2015 межі відносної похибки вимірювання зворотного струму $\delta I_{o\sum}$ не повинні перевищувати $\pm 10\%$ – для струмів рівних і більше 0,1 мкА та $\pm 15\%$ – для струмів менше 0,1 мкА при довірчій ймовірності 0,99. Діапазони завдання U_o та вимірювання I_o , за яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10. Діапазони завдання U_o та вимірювання I_o ,

Модель калібратора- мультиметра	Діапазон завдання зворотної напруги	Діапазон вимірювання зворотного струму	$\delta I_{o\sum}, \%$
2410	$(65 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	$(2,5 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	± 15
	$(4,5 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	$(30 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	
	$(65 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	$(3,5 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	± 10
	$(12 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	$(6 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	
	$(7 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	$(30 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	

2425	$(61 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	$(5 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	± 15
	$(4,5 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	$(72 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	
	$(61 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	$(8 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	± 10
	$(12 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	$(14 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	
	$(7 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	$(72 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	

Відповідно до ДСТУ ІЕС 60747-2:2015 межі відносної похибки вимірювання прямої напруги $\delta U_{\text{пз}}$ не повинні перевищувати $\pm 5 \%$. Діапазони завдання $I_{\text{п}}$ та вимірювання $U_{\text{п}}$, за яких виконуються дані умови, наведено у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11. Діапазони завдання $I_{\text{п}}$ та вимірювання $U_{\text{п}}$,

Модель калібратора- мультиметра	Діапазон завдання прямого струму	Діапазон вимірювання прямого струму	$\delta I_{\text{оз}}, \%$
2410	$(65 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	$(7,5 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	± 5
	$(25 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	$(12 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	
	$(15 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ А}$	$(30 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	
2425	$(2 \cdot 10^{-7} - 3) \text{ А}$	$(7,5 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 5
	$(81 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	$(12 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	
	$(50 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ А}$	$(30 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	

Межі відносної похибки вимірювання зворотної напруги δU_{Σ} не повинні перевищувати $\pm 10 \%$. Діапазони завдання I_0 та вимірювання U_0 , за яких виконуються ці умови, наведені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12. Діапазони завдання I_0 та вимірювання U_0 ,

Модель калібратора- мультиметра	Діапазон завдання зворотного струму	Діапазон вимірювання зворотної напруги	$\delta I_{0\Sigma}$, %
2410	$(65 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	$(3,5 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	± 10
	$(25 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	$(6 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	
	$(7 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	$(30 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	
2425	$(20 \cdot 10^{-8} - 3) \text{ A}$	$(3,5 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 10
	$(40 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	$(6 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	
	$(23 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	$(30 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	

Обидва варіанти виконання забезпечують:

- обмеження максимального струму/напруги на приладі при завданні напруги/струму;
- затримку між моментом встановлення напруги (струму), що подається на прилад, і моментом вимірювання струму (напруги) від 0 до 9 999 с, крок затримки 0,001 с;
- автоматичний вимір зворотної напруги для чотирьох заданих значень зворотного струму;
- відображення виміряних значень зворотної напруги, зворотного струму, прямої напруги, диференціального опору.

4.2. Призначення та принцип дії системи

Принцип дії системи полягає у завданні прямого струму (зворотного струму або зворотної напруги) та вимірі прямої напруги (зворотної напруги або зворотного струму) на напівпровідниковому приладі (НПП).

Калібратор-мультиметр цифровий 2410 (2425) (далі – мультиметр) по команді від ПК виконує завдання необхідного параметра (струму або напруги) на НПП, встановлений у вузлі комутації, та вимірювання необхідного параметра НПП (напруги або струму). Для виключення виходу з ладу випробуваного НПП вводиться обмеження максимального значення параметра, що вимірюється.

Кількість точок вимірювання (до чотирьох), тип параметрів, що задаються та вимірюються, їх величина, а також значення затримки між моментами завдання та вимірювання визначається згідно з технічними умовами (ТУ) на вимірюваний НПП і задається в програмі.

Залежно від типу випробуваного НПП та величини вимірюваних електричних параметрів схема системи може приймати три основні види (рис. 4.1 -4.3).

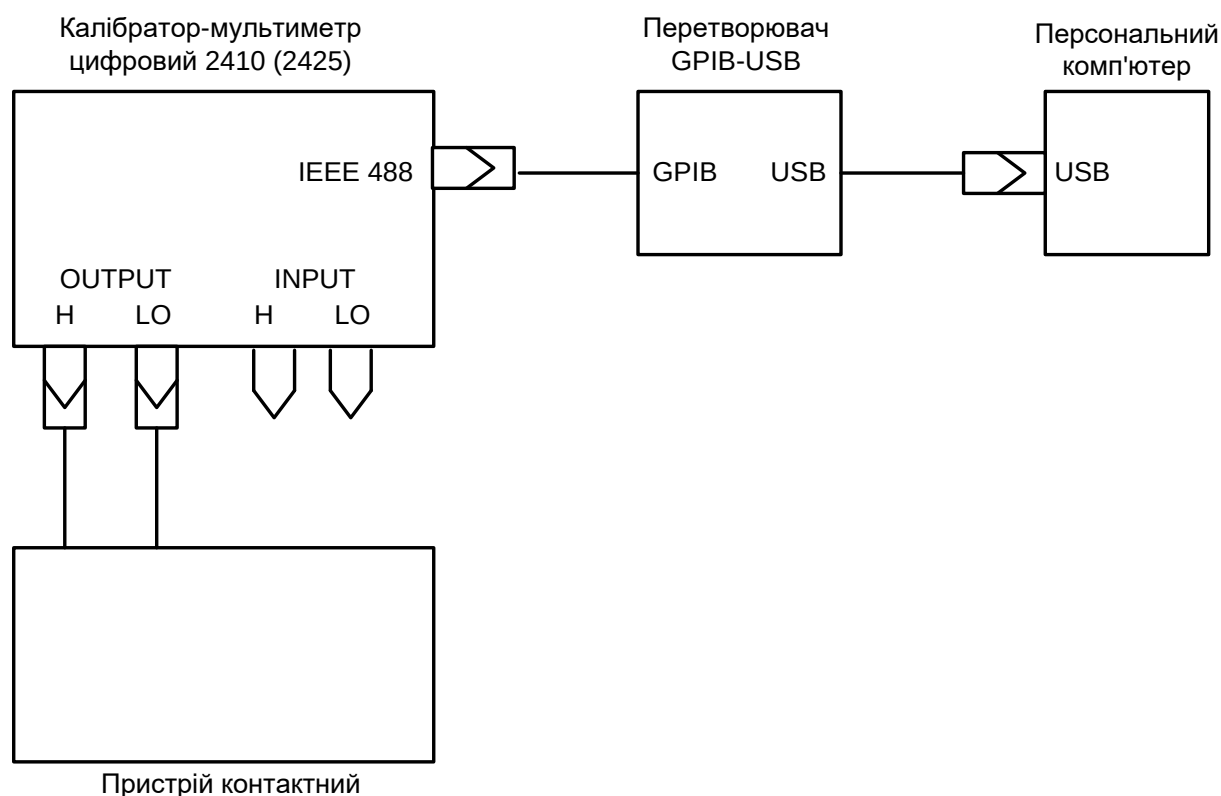


Рис. 4.1. Схема системи при 2-провідній схемі вимірювання та використання контактного пристрою

Схема на рис. 4.1 застосовується при вимірі НПП з одним діодом в корпусі за 2-провідною схемою.

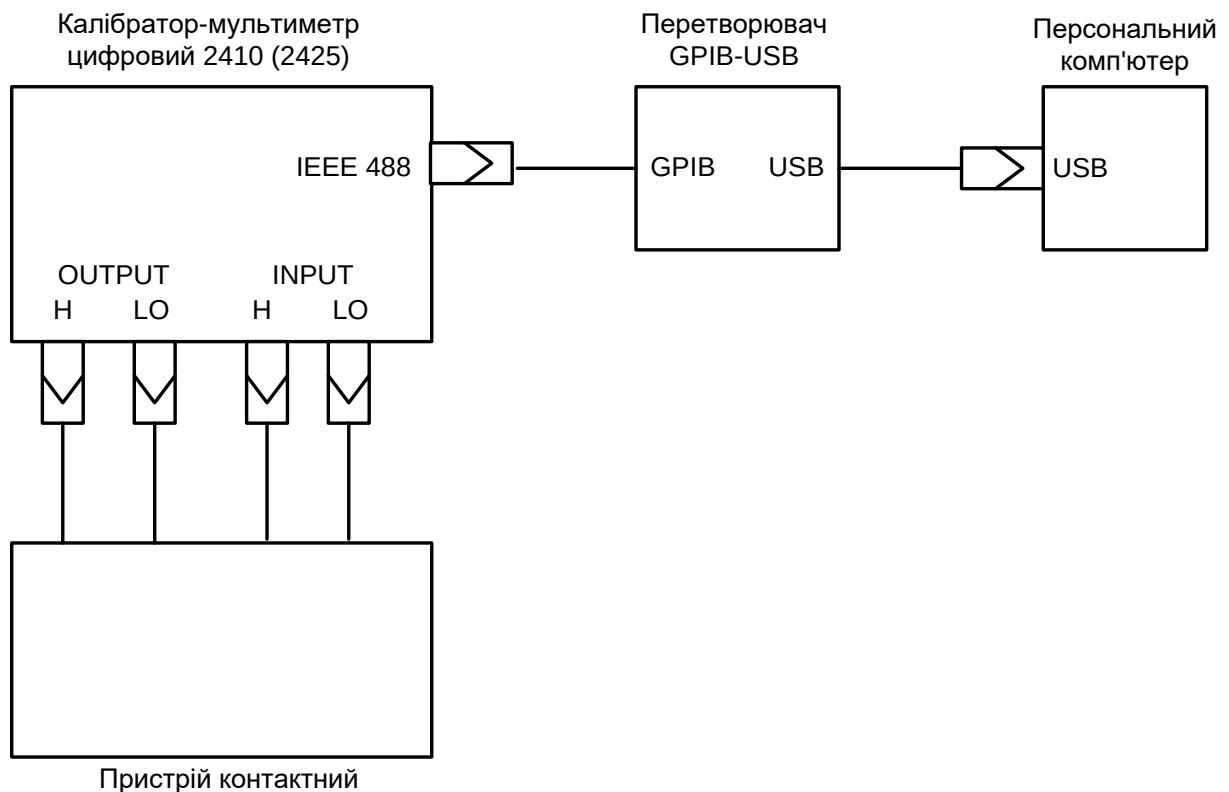


Рис. 4.2. Схема системи при 4-провідній схемі вимірювання та використання контактного пристрою

Схема на рис. 4.2 застосовується для вимірювання НПП з одним діодом у корпусі за 4-провідною схемою. При цьому подача струму до вузла комутації здійснюється за однією парою проводів, а вимірювання за допомогою іншої пари.

Пристрій контактний призначений для приєднання виробів до установки, забезпечення фіксації та контакту виробів під час випробувань.

Вибір відповідного контактного пристрою здійснюється згідно з конструкторськими особливостями корпусів діодів.

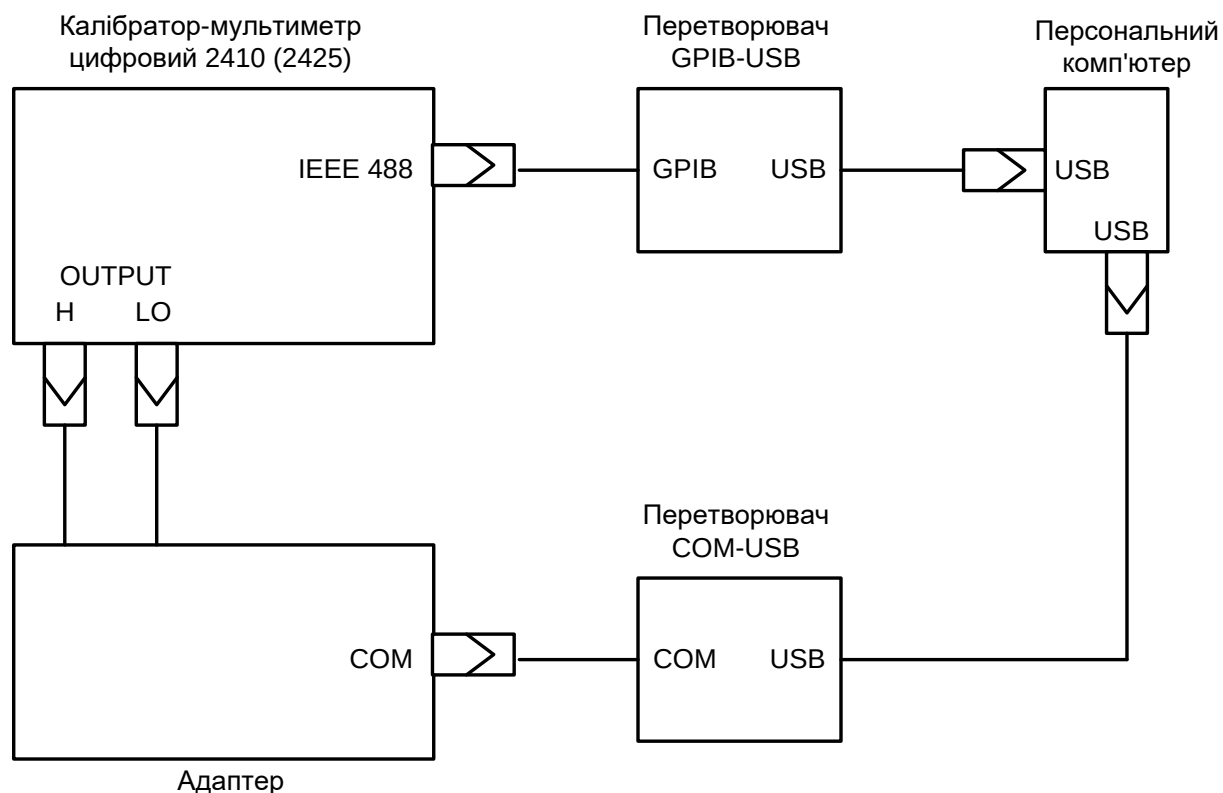


Рис. 4.3 Схема системи при 2-провідній схемі вимірювання та використанні адаптера

Схема на рис. 4.3 застосовується вимірювання параметрів НПП з двома (чи більше) діодами в корпусі. Комутація (вибір) діода НПП до вимірювальної схеми відбувається за допомогою послідовного натискання оператором кнопки на адаптері.

Перетворювачі GPIB-USB та COM-USB (рис. 4.3) призначені для узгодження вихідних інтерфейсів мультиметра та вузла комутації відповідно та вхідних інтерфейсів ПК.

4.3. Калібратори-мультиметри серії 2400 компанії Keithley

Серія 2400 калібраторів-мультиметрів компанії Keithley спеціально розроблена для вимірювальних завдань, у яких необхідний тісний взаємозв'язок між джерелом тестових сигналів та вимірювачем. Усі калібратори-мультиметри серії 2400 містять високостабільне джерело напруги та струму, а також прецизійний мультиметр. Вбудоване джерело має малий шум, високу точність і можливість контролювати точність вихідної напруги і струму. Вбудований мультиметр має малий шум і високу повторюваність результатів вимірювання. Всі ці можливості поєднуються в одному корпусі, що дає в результаті компактний одноканальний параметричний тестер на постійному струмі. Також калібратори-мультиметри серії Keithley 2400 можуть працювати в режимі джерела напруги, струму, вимірювача напруги, струму, опору.

Області застосування:

- дискретні напівпровідникові пристрої;
- пасивні електронні компоненти;
- пригнічувачі перехідних процесів;
- мікросхеми, у тому числі RFICs, MMICs;
- лазерні діоди та діодні модулі, LED, фотодетектори;
- захисні пристрої: TVS, MOV, запобіжники та інше;
- подушки безпеки;
- коннектори, перемикачі, реле;
- надяскраві світлодіоди (на постійному струмі та в імпульсі) ;
- тестування струмів витоку;
- точне джерело та вимірювач високої напруги/струму;
- тестування LIV (light-current-voltage) ;
- тестування IDDQ;
- побудова вольтамперних характеристик (BAX) ;

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

- перевірка ізоляції та опору між доріжками на друкованій платі;
- тестування температурного коефіцієнта;
- тестування прямої напруги, зворотної напруги пробою та струмів витоку;
- тестування діелектриків;
- перевірка ефективності фотогальванічних осередків (в режимі джерела та навантаження).

Високовольтний калібратор-мультиметр Keithley 2410 (рис. 4.4) американської компанії Keithley – це багатофункціональний прилад, що поєднує у собі можливості прецизійного джерела напруги (до 1000 В) та струму (до 1 А) з точним мультиметром 6,5 розрядів (вимірює напругу, струм, опір). Таке об'єднання дає три основні переваги: спрощення та прискорення завдань тестування, зниження вартості, зменшення кількості проводів та місця, що займає прилади. Модель Keithley 2410-С додатково містить вбудовану функцію перевірки якості з'єднувальних проводів перед початком тестування [15].



Рис. 4.4. Високовольтний калібратор-мультиметр Keithley 2410

Основні характеристики калібратора-мультиметра Keithley 2410:

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

Роздільна здатність: 6,5 розрядів.

Базова точність (DCV): 0,012%.

Напруга: від 5 мкВ до 1000 В (генерація), від 1 мкВ до 1100 (вимірювання).

Струм: від 50 пА до 1 А (генерація).

Від 10 пА до 1,05 А (вимірювання).

Опір: від 100 мкОм до 200 МОм (Вимірювання).

Вихідна потужність: до 20 Вт.

4-х квадрантна робоча область (генерація напруги/струму або робота в режимі навантаження).

2-х, 4-х та 6-ти провідна схема підключення.

Швидкість: до 2081 вимірювань в секунду.

Вбудований компаратор "придатний/негідний" для автоматичного відбракування.

Можливість автоматичного формування серій контрольних точок.

Автоматична перевірка контактів з'єднання (модель 2410-С).

Безкоштовне програмне забезпечення для комп'ютера та драйвер LabVIEW.

Інтерфейси: IEEE-488.2 (GPIB), RS-232, Keithley Trigger Link.

Маса: 3,21 кг.

Високовольтний калібратор-мультиметр (SMU) до 1000 В.

Потужний калібратор-мультиметр Keithley 2425 (рис. 4.5) американської компанії Keithley – це багатофункціональний прилад, що поєднує у собі можливості прецизійного джерела напруги (до 100 В) та струму (до 3 А) з точним мультиметром 6,5 розрядів (вимірює напругу, струм, опір). Таке об'єднання дає три основні переваги: спрощення та прискорення завдань тестування, зниження вартості, зменшення кількості проводів та місця, що займає прилади. Модель Keithley 2425-С додатково

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

містить вбудовану функцію перевірки якості з'єднувальних проводів перед початком тестування [16].



Рис. 4.5. Потужний калібратор-мультиметр Keithley 2425

Основні характеристики калібратора-мультиметра Keithley 2425:

Роздільна здатність: 6,5 розрядів.

Базова точність (DCV): 0,012%.

Напруга: від 5 мкВ до 100 В (генерація), від 1 мкВ до 105 (вимірювання).

Струм: від 500 пА до 3 А (генерація).

Від 100 пА до 3,15 А (вимірювання).

Опір: від 10 мкОм до 20 МОм (Вимірювання).

Вихідна потужність: до 100 Вт.

4-х квадрантна робоча область (генерація напруги/струму або робота в режимі навантаження).

2-х, 4-х та 6-ти провідна схема підключення.

Швидкість: до 2081 вимірів в секунду.

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вбудований компаратор "придатний/негідний" для автоматичного відбракування.

Можливість автоматичного формування серій контрольних точок.

Автоматична перевірка контактів з'єднання (модель 2425-С).

Безкоштовне програмне забезпечення для комп'ютера та драйвер LabVIEW.

Інтерфейси: IEEE-488.2 (GPIB), RS-232, Keithley Trigger Link.

Маса: 4,1 кг.

Потужний калібратор-мультиметр (SMU) до 100 Вт.

.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ТА ПРОГРАМИ РОБОТИ СИСТЕМИ

5.1. Алгоритм роботи системи

Алгоритм налаштування програмного забезпечення перед початком проведення вимірювань представлено на рис. 5.1.

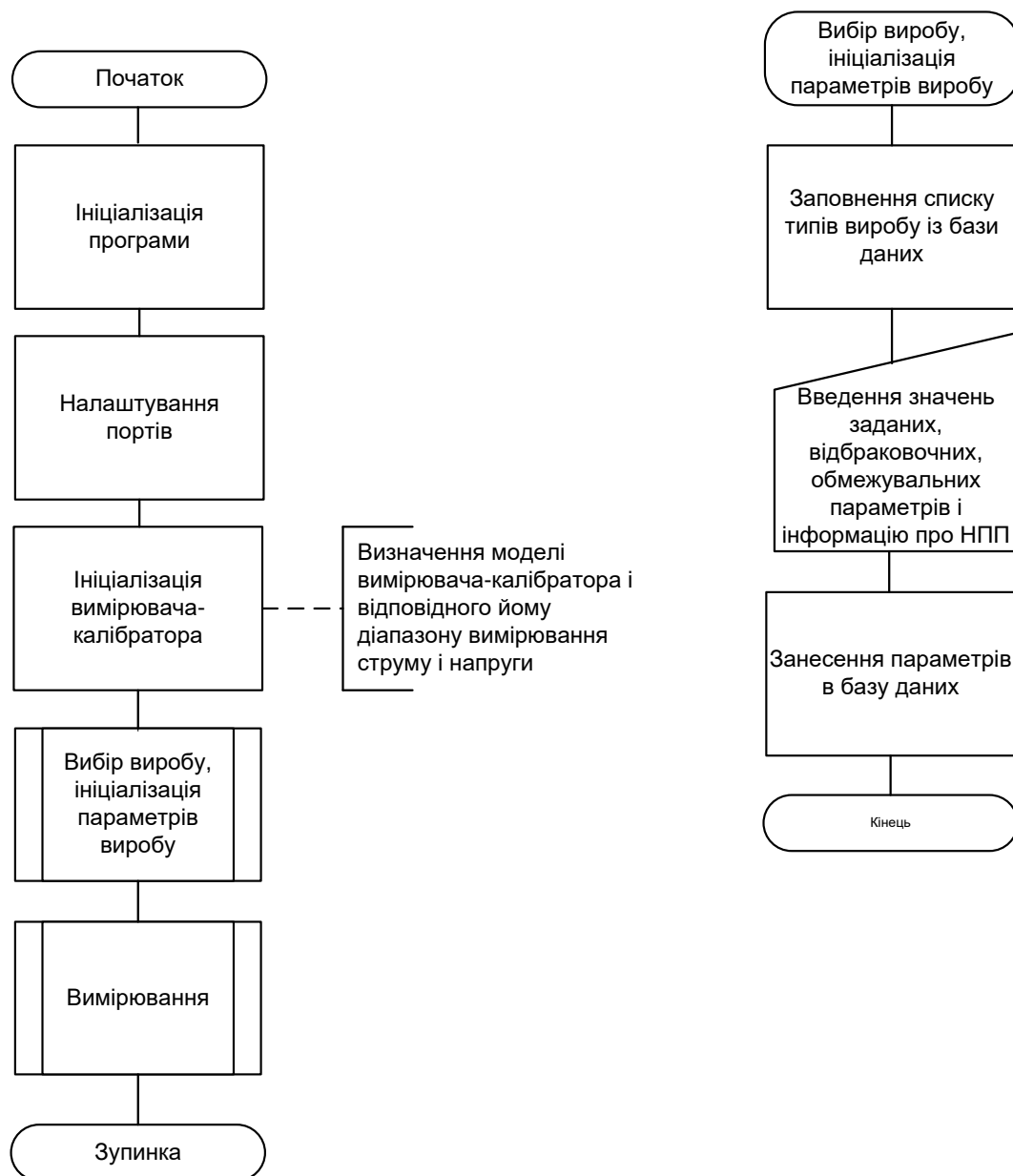


Рис. 5.1. Алгоритм налаштування програмного забезпечення

Алгоритм роботи програмного забезпечення представлений на рис. 5.2.

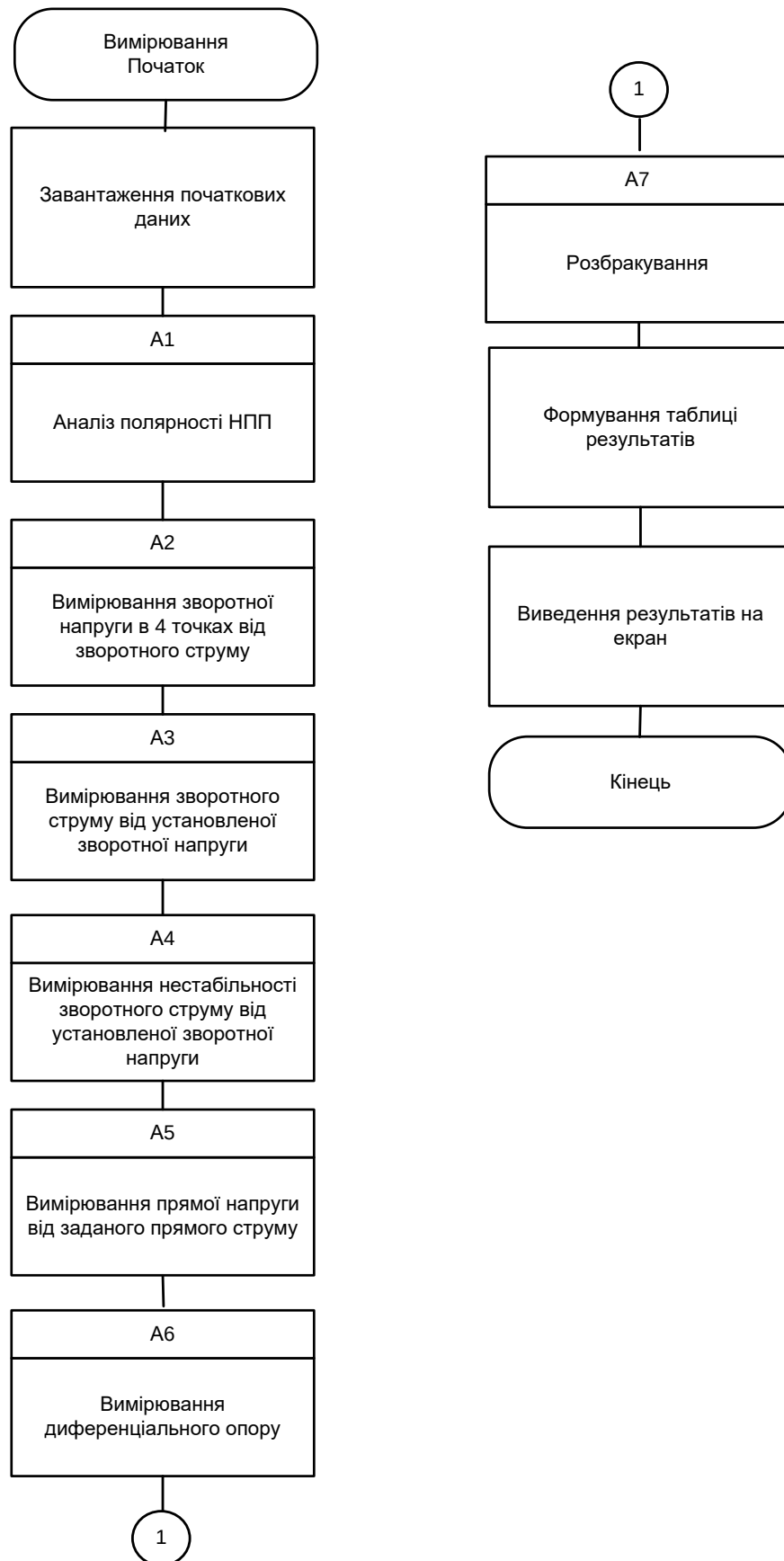
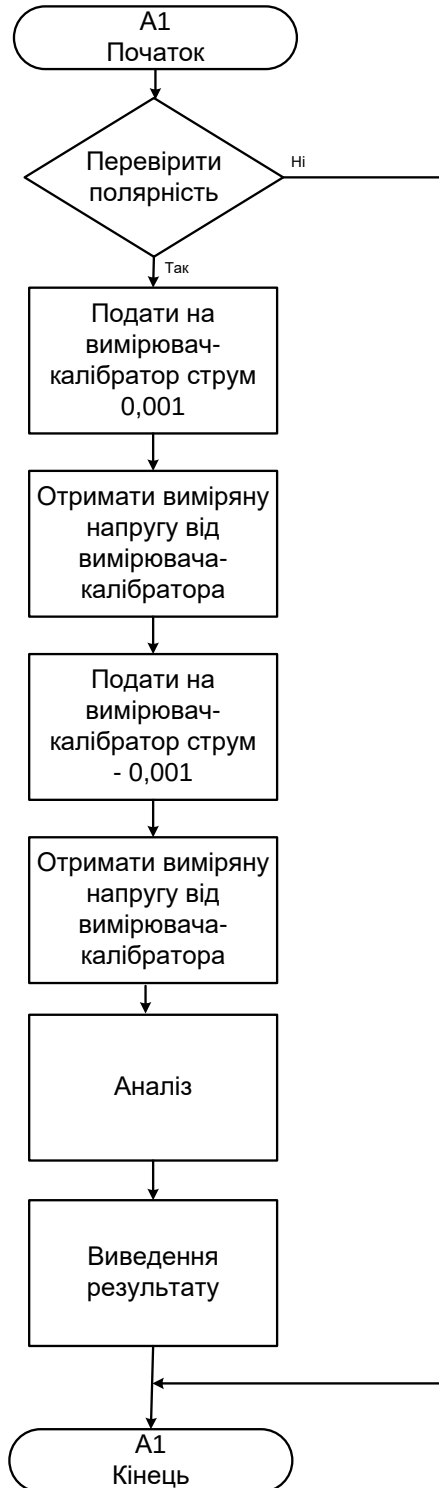


Рис. 5.2. Алгоритм роботи програмного забезпечення

5.2. Алгоритми вимірювання статичних параметрів діодів

Алгоритм проведення аналізу полярності НПП представлений на рис.

5.3.



Рис, 5.3. Алгоритм проведення аналізу полярності НПП

Алгоритм вимірювання зворотної напруги у чотирьох точках від зворотного струму представлений на рис. 5.4.

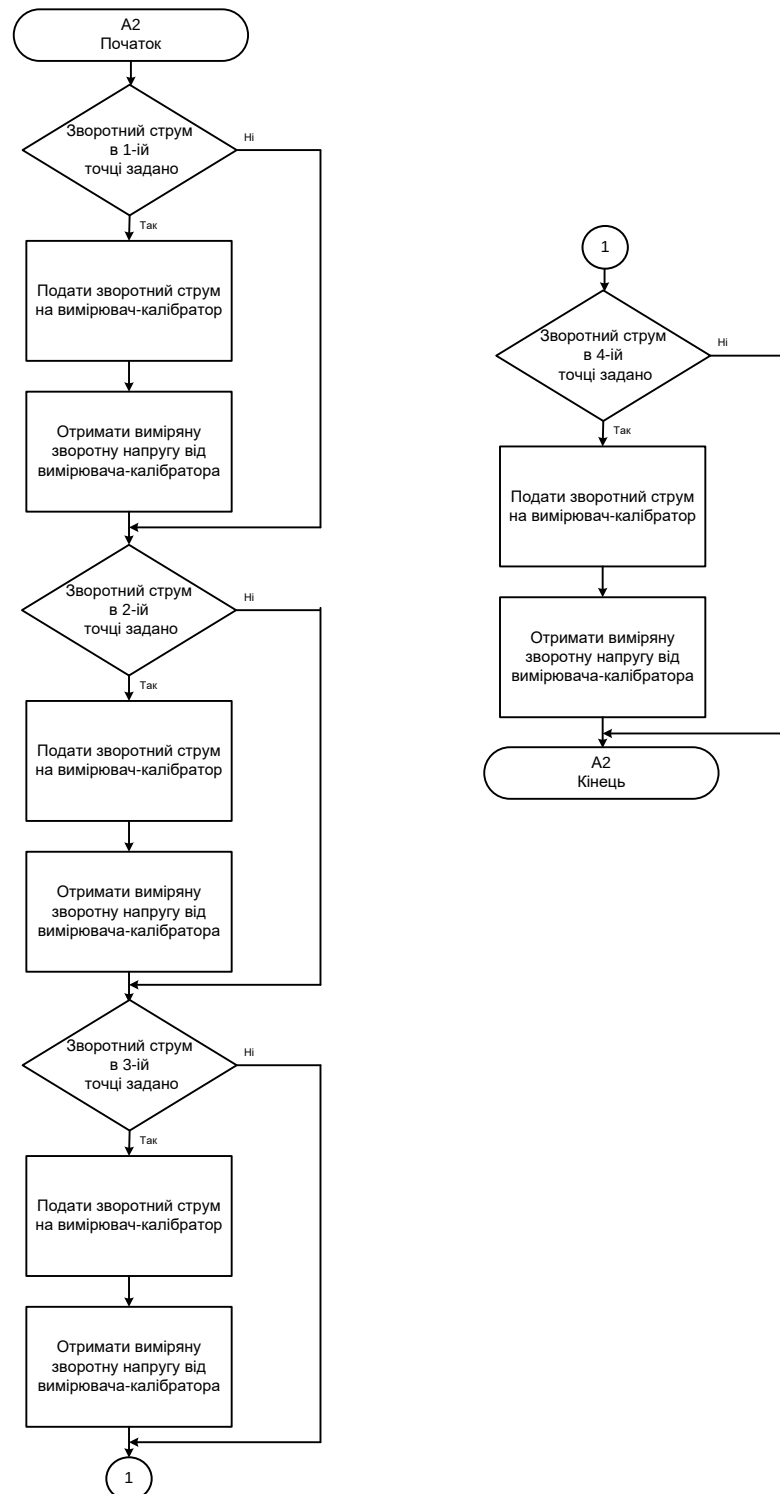


Рис. 5.4. Алгоритм вимірювання зворотної напруги у чотирьох точках від зворотного струму

Алгоритм вимірювання зворотного струму від встановленої зворотної напруги та вимірювання нестабільності зворотного струму від встановленої зворотної напруги представлений на рис. 5.5.

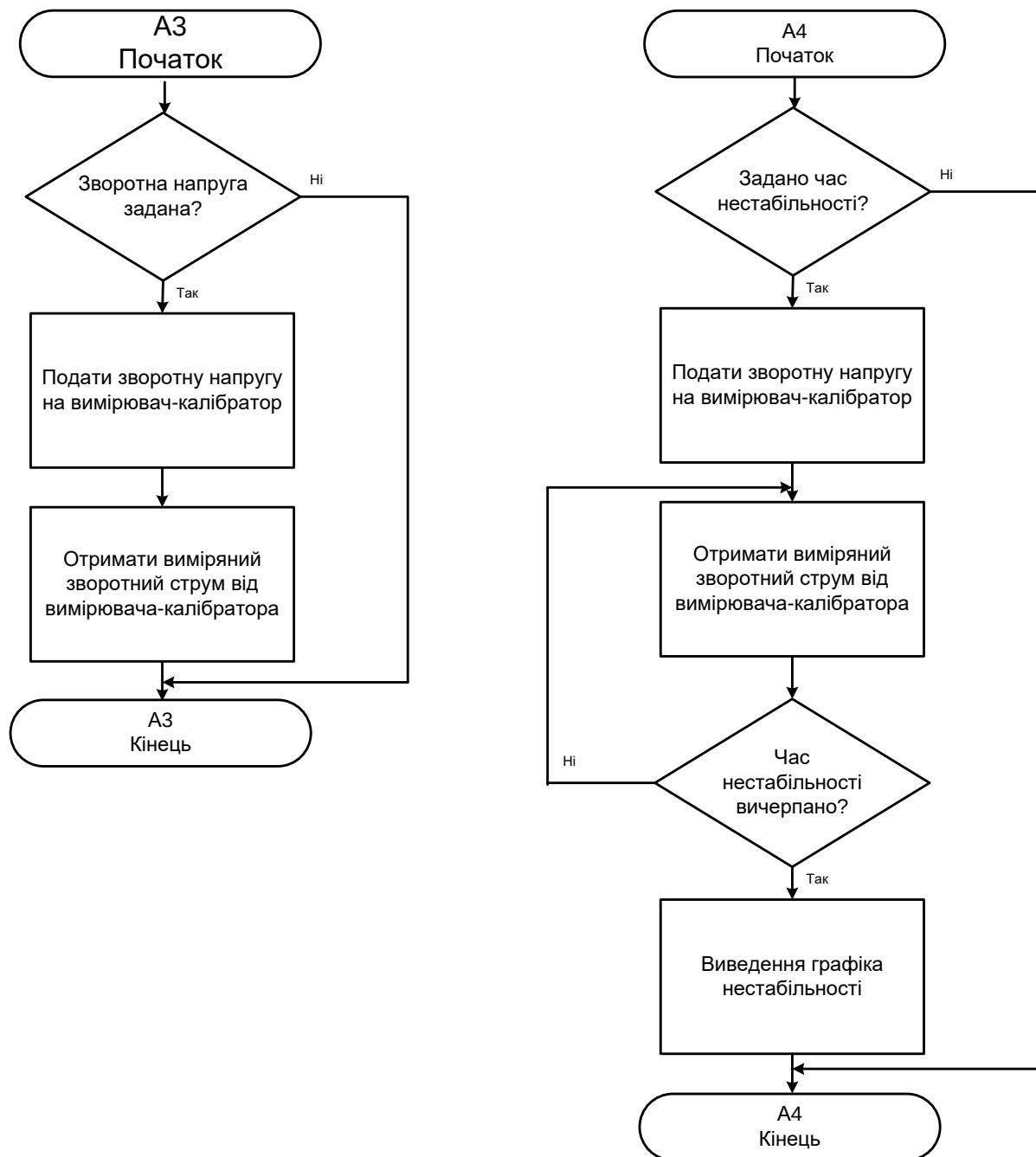


Рис. 5.5. Алгоритм вимірювання зворотного струму від встановленої зворотної напруги та вимірювання нестабільності зворотного струму від встановленої зворотної напруги

Алгоритм вимірювання прямої напруги від заданого прямого струму та вимірювання диференціального опору представлений на рис. 5.6.

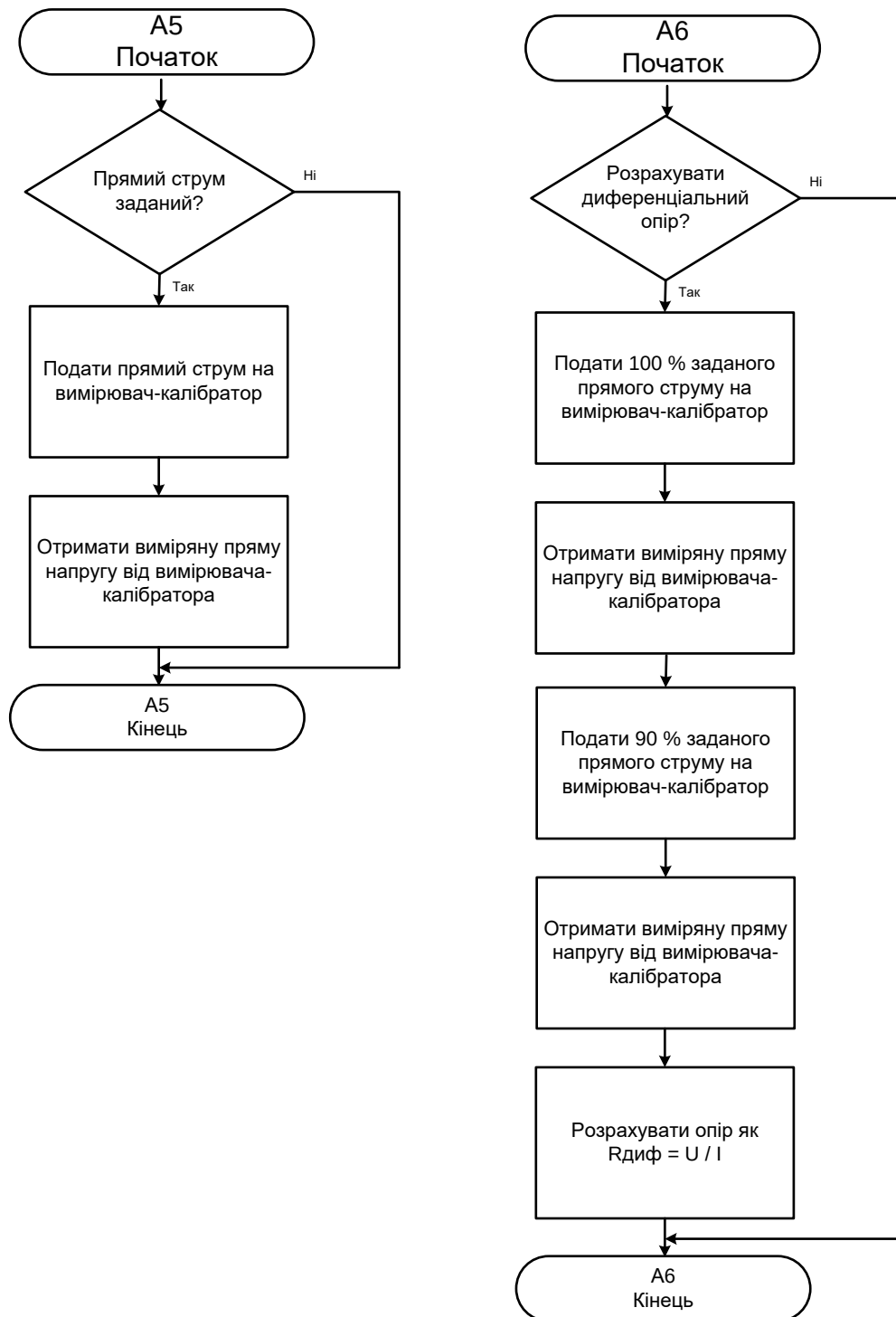


Рис. 5.6. Алгоритм вимірювання прямої напруги від заданого прямого струму та вимірювання диференціального опору

Алгоритм проведення розбракування представлений на рис. 5.7.

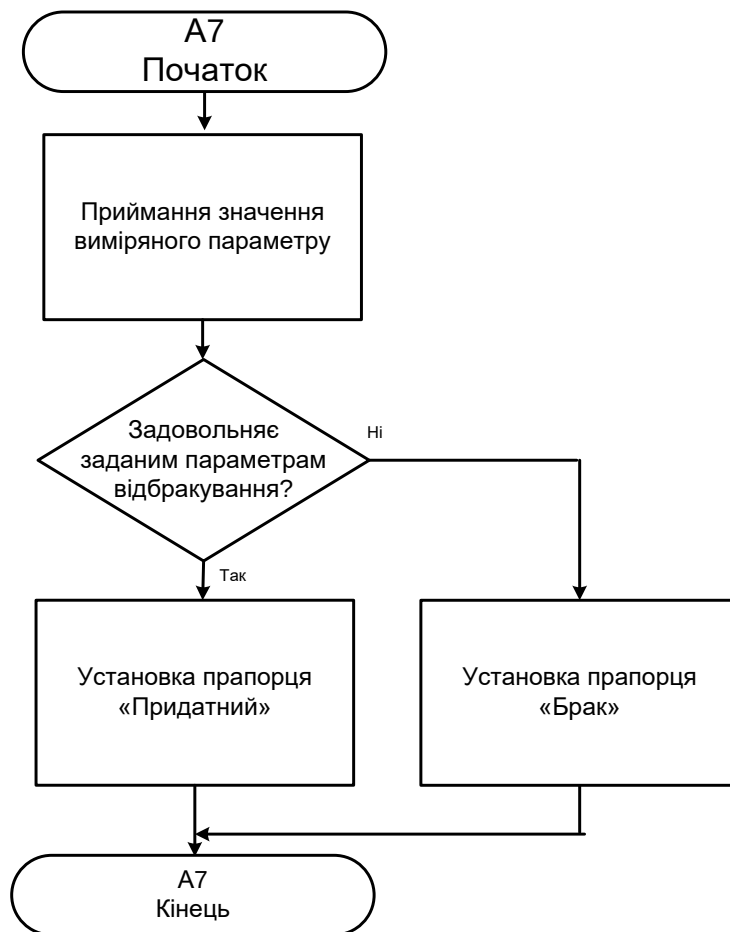


Рис. 5.7. Алгоритм проведення розбракування

Програма працює у складі системи вимірювання статичних параметрів та призначена для керування мультиметром.

Функції, які виконує програма:

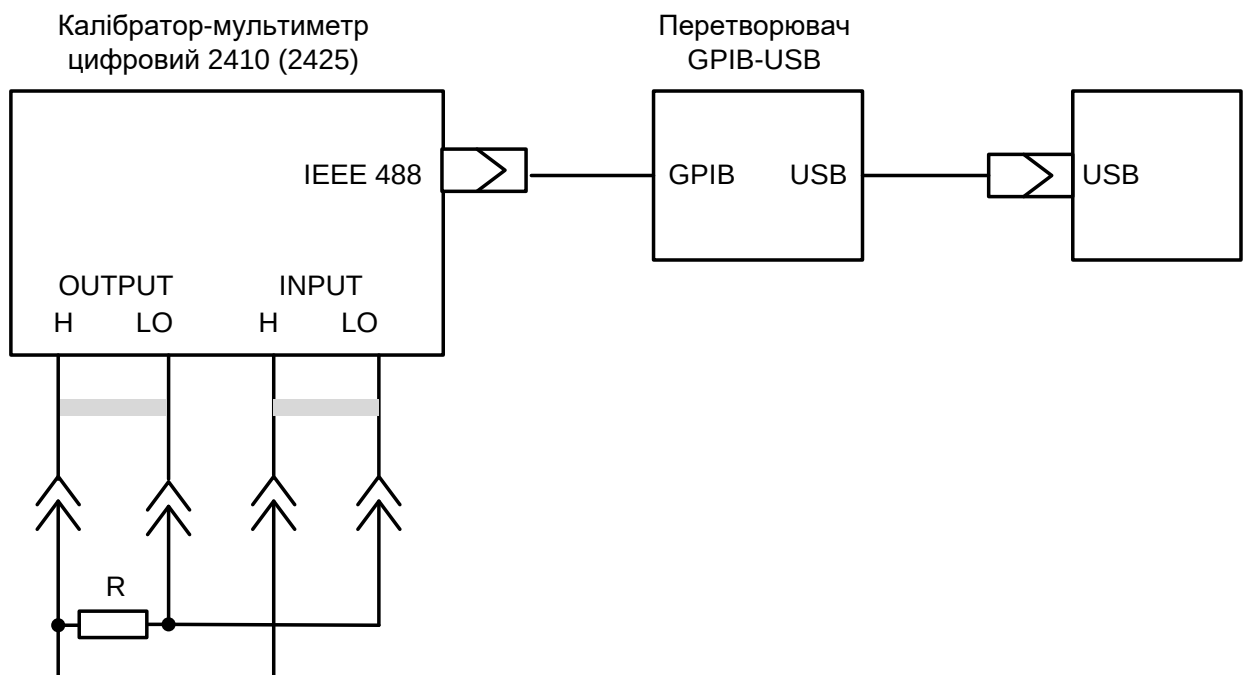
- введення/відображення типу і значення параметра, що задається/вимірюється, часової затримки між моментом установки параметра, що задається, і моментом вимірювання відповідного параметра;
- завдання вимірювальної схеми – 2-провідний або 4-провідний;
- ініціалізація типу мультиметра, що застосовується при вимірі;
- побудова графіка залежності зворотного струму від часу та ВАХ НПП;

- завдання відбракувальних параметрів і відбраковування НПП згідно з ТУ;
- збереження типу і значення параметра, що задається, а також відбракувальних параметрів згідно з ТУ на конкретний тип НПП;
- подання результатів вимірювань у табличному вигляді;
- збереження результатів вимірювань.

5.3. Перевірка програмного управління процесом виміру

Перевірка програмного управління процесом вимірювання полягає у перевірці правильності встановлення, передачі та відображення параметрів у заданих діапазонах.

Схема для перевірки зображена на рис. 5.8.



R – імітатор навантаження.

Рис. 5.8 Схема для проведення перевірки

Використання імітатора навантаження забезпечує перевірку необхідного діапазону напруги (струму), що задається, і необхідного діапазону вимірювання струму (напруги). Вибір імітатора навантаження для струму здійснюється згідно з таблицею 5.1.

Таблиця 5.1. Вибір імітатора навантаження для струму

Імітатор навантаження	Тип мультиметра	Діапазон струму, що задається	Діапазон струму, що вимірюється
Котушка опору P321 0,1 Ом	2425	(1–3) А	(1–3) А
Котушка опору P321 1 Ом	2410, 2425	$(10^{-3}-1)$ А	$(10^{-3}-1)$ А
Магазин опорів P40102, 20 кОм	2410, 2425	$(50 \cdot 10^{-12}-10^{-6})$ А	–
Магазин опорів P40102, 510 кОм	2410	–	$(10 \cdot 10^{-12}-10^{-6})$ А
Магазин опорів P40102, 1 МОм	2410	$(10^{-6}-10^{-3})$ А	$(10^{-6}-10^{-3})$ А
	2425	$(10^{-6}-10^{-4})$ А	$(10^{-6}-10^{-4})$ А

Вибір імітатора навантаження для напруги здійснюється згідно з таблицею 5.2.

Таблиця 5.2. Вибір імітатора навантаження для напруги

Імітатор навантаження	Тип мультиметра	Діапазон напруги, що задається	Діапазон напруги, що вимірюється
Котушка опору P321 0,1 Ом	2425	(0,1–0,3) В	(0,1–0,3) В

Котушка опору P321 1 Ом	2410, 2425	$(10^{-3}-1) В$	$(10^{-3}-1) В$
Магазин опорів P40102, 20 кОм	2410, 2425	—	$(10^{-6}-20\cdot 10^{-3}) В$
Магазин опорів P40102, 510 кОм	2410	$(5\cdot 10^{-4}-500\cdot 10^{-3}) В$	—
Магазин опорів P40102, 1 МОм	2410	$(1-1\ 000) В$	$(1-1\ 000) В$
	2425	$(1-100) В$	$(1-100) В$

Під час перевірки установки та вимірювання параметрів необхідно переконатися, що значення верхнього і нижнього лівого рядків на дисплеї мультиметра збігаються з відповідними полями відповідної панелі програми.

6. РОЗРАХУНОК МЕТРОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

6.1. Методика розрахунку похибки вимірювання електричних параметрів діодів

Розрахунок діапазонів вимірювання електричних параметрів з використанням калібратора-мультиметра цифрового 2410

Межі відносної похибки вимірювання зворотного струму за довірчої ймовірності 0,99 визначається за формулою

$$\delta I_{o\Sigma} = \pm(\delta U_o + \delta I_o), \quad (6.1)$$

де δU_o – відносна похибка завдання зворотної напруги; δI_o – відносна похибка вимірювання зворотного струму.

Відповідно до ДСТУ ІЕС 60747-2:2015 відносна похибка $\delta I_{o\Sigma}$ не повинна виходити за межі $\pm 10\%$ – для струмів рівних і більше 0,1 мкА та $\pm 15\%$ для струмів менше 0,1 мкА при довірчій ймовірності 0,99. Діапазони завдання U_o , вимірювання I_o та похибки, при яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Діапазони завдання U_o , вимірювання I_o

Діапазон завдання зворотної напруги	$\delta U_o, \%$	Діапазон виміру зворотного струму	$\delta I_o, \%$
$(65 \cdot 10^{-3} - 1\ 000)\text{ В}$	± 1	$(2,5 \cdot 10^{-9} - 1)\text{ А}$	± 14
$(65 \cdot 10^{-3} - 1\ 000)\text{ В}$	± 1	$(3,5 \cdot 10^{-9} - 1)\text{ А}$	± 9
$(12 \cdot 10^{-3} - 1\ 000)\text{ В}$	± 5	$(6 \cdot 10^{-9} - 1)\text{ А}$	± 5
$(7 \cdot 10^{-3} - 1\ 000)\text{ В}$	± 9	$(30 \cdot 10^{-9} - 1)\text{ А}$	± 1
$(4,5 \cdot 10^{-3} - 1\ 000)\text{ В}$	± 14	$(30 \cdot 10^{-9} - 1)\text{ А}$	± 1

Межі відносної похибки вимірювання прямої напруги за довірчої ймовірності 0,99 визначається за формулою

$$\delta U_{\Sigma} = \pm(\delta I_{\Pi} + \delta U_{\Pi}), \quad (6.2)$$

де δI_{Π} – відносна похибка завдання прямого струму;

δU_{Π} - відносна похибка вимірювання прямої напруги.

Відповідно до ДСТУ ІЕС 60747-2:2015 відносна похибка δU_{Σ} не повинна виходити за межі $\pm 5\%$. Діапазони завдання I_{Π} , вимірювання U_{Π} та похибки, за яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Діапазони завдання I_{Π} , вимірювання U_{Π}

Діапазон завдання прямого струму	$\delta I_{\Pi}, \%$	Діапазон виміру прямої напруги	$\delta U_{\Pi}, \%$
$(65 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	± 1	$(7,5 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	± 4
$(25 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	$\pm 2,5$	$(12 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	$\pm 2,5$
$(15 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	± 4	$(30 \cdot 10^{-3} - 1\,000) \text{ В}$	± 1

Межі відносної похибки вимірювання зворотної напруги за довірчої ймовірності 0,99 визначаються за формулою

$$\delta U_{\Sigma} = \pm(\delta I_0 + \delta U_0), \quad (6.3)$$

де δI_0 – відносна похибка завдання зворотного струму;

δU_0 – відносна похибка виміру зворотної напруги.

Похибка δU_{Σ} не повинна перевищувати 10% . Діапазони завдання I_0 , вимірювання U_0 та похибки, за яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. Діапазони завдання I_o , вимірювання U_o

Діапазон завдання зворотного струму	δI_o , %	Діапазон виміру зворотної напруги	δU_o , %
$(65 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	± 1	$(3,5 \cdot 10^{-3} - 1\ 000) \text{ B}$	± 9
$(12 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	± 5	$(6 \cdot 10^{-3} - 1\ 000) \text{ B}$	± 5
$(7 \cdot 10^{-9} - 1) \text{ A}$	± 9	$(30 \cdot 10^{-3} - 1\ 000) \text{ B}$	± 1

Розрахунок діапазонів вимірювання електричних параметрів з використанням калібратора-мультиметра цифрового 2425

Межі відносної похибки вимірювання зворотного струму за довірчої ймовірності 0,99 визначається за формулою

$$\delta I_{o\Sigma} = \pm(\delta U_o + \delta I_o), \quad (6.4)$$

де δU_o – відносна похибка завдання зворотної напруги;

δI_o – відносна похибка вимірювання зворотного струму.

Діапазони завдання U_o , вимірювання I_o та похибки, при яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4. Діапазони завдання U_o , вимірювання I_o

Діапазон завдання зворотної напруги	δU_o , %	Діапазон виміру зворотного струму	δI_o , %
$(61 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ B}$	± 1	$(5 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 14
$(61 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ B}$	± 1	$(8 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 9
$(12 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ B}$	± 5	$(14 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 5
$(7 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ B}$	± 9	$(72 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 1
$(4,5 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ B}$	± 14	$(72 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 1

Межі відносної похибки вимірювання прямої напруги за довірчої

ймовірності 0,99 визначається за формулою

$$\delta U_{\pi\Sigma} = \pm(\delta I_{\pi} + \delta U_{\pi}), \quad (6.5)$$

де δI_{π} – відносна похибка завдання прямого струму;

δU_{π} – відносна похибка виміру прямої напруги.

Діапазони завдання I_{π} , вимірювання U_{π} та похибки, за яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 20.

Таблиця 6.5. Діапазони завдання I_{π} , вимірювання U_{π}

Діапазон завдання прямого струму	δI_{π} , %	Діапазон виміру прямої напруги	δU_{π} , %
$(2 \cdot 10^{-7} - 3) \text{ A}$	± 1	$(7,5 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 4
$(81 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	$\pm 2,5$	$(12 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	$\pm 2,5$
$(50 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 4	$(30 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 1

Межі відносної похибки вимірювання зворотної напруги за довірчої ймовірності 0,99 визначаються за формулою

$$\delta U_{o\Sigma} = \pm(\delta I_o + \delta U_o), \quad (6.6)$$

де δI_o – відносна похибка завдання зворотного струму;

δU_o – відносна похибка виміру зворотної напруги.

Діапазони завдання I_o , вимірювання U_o та похибки, при яких виконуються дані умови, наведені в таблиці 21.

Таблиця 6.6 Діапазони завдання I_o , вимірювання U_o

Діапазон завдання зворотного струму	δI_o , %	Діапазон виміру зворотної напруги	δU_o , %
$(20 \cdot 10^{-8} - 3) \text{ A}$	± 1	$(3,5 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 9
$(40 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 5	$(6 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 5
$(23 \cdot 10^{-9} - 3) \text{ A}$	± 9	$(30 \cdot 10^{-3} - 100) \text{ В}$	± 1

6.2. Методика розрахунку похибки виміру диференціального опору

Розрахунок диференціального опору провадиться за наступним алгоритмом:

– значення струмів розраховуються за формулами

$$I_{п1} = 0,95 \cdot I_{п} \quad (6.7)$$

$$I_{п2} = 1,05 \cdot I_{п} \quad (6.8)$$

де $I_{п}$ – значення поданого прямого струму, А;

$I_{п1}$ – мінімальне значення прямого струму, А;

$I_{п2}$ – максимальне значення прямого струму, А.

– за командою від програми мультиметр подає на діод струм прямокутної форми, максимальне значення якого дорівнює $I_{п2}$, а мінімальне – $I_{п1}$;

–мультиметр здійснює вимірювання прямої напруги на діоді при струмах $I_{п1}$ и $I_{п2}$;

–у програмі розраховується диференціальний опір $R_{дф}$, в омах за формулою

$$R_{дф} = \frac{U_{п2} - U_{п1}}{I_{п2} - I_{п1}}, \quad (6.9)$$

де $U_{п1}$ – значення прямої напруги на діоді при прямому струмі, що дорівнює $I_{п1}$, В.

$U_{п2}$ – значення прямої напруги на діоді при прямому струмі, рівному $I_{п2}$.

Значення $I_{п1}$, $I_{п2}$, $U_{п1}$ и $U_{п2}$ не відображаються.

Відносна похибка вимірювання $R_{дф}$ не повинна виходити за межі $\pm 7 \%$ (згідно ДСТУ ІЕС 60747-2:2015) при довірчій ймовірності $P = 0,997$

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\delta R_{\text{дф}} < 7 \%. \quad (6.10)$$

Межі відносної похибки вимірювання $R_{\text{дф}}$ за довірчої ймовірності 0,997 визначаються за формулою

$$\delta R_{\text{дф}} = \pm 1,4 \cdot \sqrt{\delta I_{\text{п1}}^2 + \delta I_{\text{п2}}^2 + \delta U_{\text{п1}}^2 + \delta U_{\text{п2}}^2}, \quad (6.11)$$

де $\delta I_{\text{п1}}$ – відносна похибка завдання прямого струму $I_{\text{п1}}$, %;

$\delta I_{\text{п2}}$ – відносна похибка завдання прямого струму $I_{\text{п1}}$, %;

$\delta U_{\text{п1}}$ – відносна похибка вимірювання прямої напруги на діоді при прямому струмі $I_{\text{п1}}$, %;

$\delta U_{\text{п2}}$ – відносна похибка вимірювання прямої напруги на діоді при прямому струмі $I_{\text{п2}}$, %.

Відносні похибки $\delta I_{\text{п1}}$, $\delta I_{\text{п2}}$, $\delta U_{\text{п1}}$, $\delta U_{\text{п2}}$ визначаються основною відносною похибкою мультиметра за формулою

$$\delta_o = \pm \left[A + B \cdot \left(\frac{R}{M} \right) \right], \quad (6.12)$$

де A – мультиплікативний компонент похибки, %;

B – адитивний компонент похибки, %;

R – верхня межа діапазону заданої (вимірюваної) величини, $A(B)$;

M – значення заданої (вимірюваної) величини, $A(B)$.

Формула основної відносної похибки наведено в описі типу засобу вимірювання мультиметр.

Нижче наведено розрахунок відносних похибок $\delta I_{\text{п1}}$, $\delta I_{\text{п2}}$, $\delta U_{\text{п1}}$, $\delta U_{\text{п2}}$ для діода КД510 у діапазоні завдання прямого струму від 10 до 100 мА.

Розрахунок відносної похибки завдання прямого струму та

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

вимірювання прямої напруги при використанні мультиметра 2410 наведено у таблиці 6.7.

Таблиця 6.7. Розрахунок відносної похибки завдання прямого струму та вимірювання прямої напруги при використанні мультиметра 2410

Режим	Пара-метр	Значення параметра	A, %	B, %	R	M	δ_0^* , %
Завдання	I _{п1}	10 мА	0,045	0,02	20 мА	10 мА	0,085
	I _{п2}	11 мА	0,045	0,02	20 мА	11 мА	0,081
Вимір	U _{п1}	0,68 В	0,012	0,015	2 В	0,68 В	0,056
	U _{п2}	0,69 В	0,012	0,015	2 В	0,69 В	0,055
Завдання	I _{п1}	100 мА	0,27	0,09	1 А	100 мА	1,17
	I _{п2}	110 мА	0,27	0,09	1 А	110 мА	1,088
Вимір	U _{п1}	0,89 В	0,012	0,015	2 В	0,89 В	0,046
	U _{п2}	0,89 В	0,012	0,015	2 В	0,89 В	0,046

Розраховуємо похибки для наборів I_{п1}, I_{п2}, U_{п1}, U_{п2} за формулою (6.11) та вибираємо найбільшу. Тоді межі відносної похибки вимірювання диференціального опору $R_{дф} = \pm 2,2 \%$ з довірчою ймовірністю 0,997.

Розрахунок відносної похибки завдання прямого струму та вимірювання прямої напруги при використанні мультиметра 2425 наведено в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8. Розрахунок відносної похибки завдання прямого струму та вимірювання прямої напруги при використанні мультиметра 2425

Режим	Пара-метр	Значення параметра	A, %	B, %	R	M	δ_0^* , %
Завдання	I _{п1}	10 мА	0,066	0,02	100 мА	10 мА	0,266
	I _{п2}	11 мА	0,066	0,02	100 мА	11 мА	0,248
Вимір	U _{п1}	0,68 В	0,012	0,015	2 В	0,68 В	0,056
	U _{п2}	0,69 В	0,012	0,015	2 В	0,69 В	0,055
Завдання	I _{п1}	100 мА	0,067	0,09	1 А	100 мА	0,967
	I _{п2}	110 мА	0,067	0,09	1 А	110 мА	0,885
Вимір	U _{п1}	0,89 В	0,012	0,015	2 В	0,89 В	0,046
	U _{п2}	0,89 В	0,012	0,015	2 В	0,89 В	0,046

Виконуємо розрахунок похибки для набору I_{п1}, I_{п2}, U_{п1}, U_{п2} за формулою (6.11) та вибираємо найбільшу. Тоді межі відносної похибки вимірювання диференціального опору $R_{дф} = \pm 1,9 \%$ з довірчою ймовірністю 0,997.

7. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

7.1 Небезпека ураження електричним струмом

Оскільки в даній роботі використовується електроустаткування, для виробничого об'єкта характерною є можливість ураження електричним струмом. Щоб знизити ризик необхідно дотримуватись норм електробезпеки. Електробезпека - це система організаційних і технічних заходів та засобів, що забезпечують захист людей від шкідливого та небезпечного для життя впливу електричного струму, електричної дуги, електромагнітного поля та статичної електрики.

Небезпека ураження електричним струмом посилюється тим, що на відміну від інших небезпек людина не в змозі без спеціальних приладів виявити напругу дистанційно, як, наприклад, рухомої частини, розжарений об'єкт, відкриті люки, не огорожені майданчики на великих висотах. Небезпека виявляється надто пізно — коли людина вже вражена.

Електростатична безпека повинна забезпечуватись за рахунок створення умов, що попереджають виникнення розрядів статичної електрики, здатних стати джерелом запалювання об'єктів захисту.

Запобігання накопиченню зарядів статичної електрики досягається заземленням обладнання та комунікацій, причому кожную систему взаємопов'язаних машин, обладнання та конструкцій, виконаних з металу, заземлюють не менш ніж у двох місцях.

Для запобігання небезпеці короткого замикання використовується контактний комутаційний апарат, який використовується для заземлення частин ланцюга, здатний витримувати протягом нормованого часу струми за ненормальних умов, таких як коротке замикання.

Приміщення, де розташовані персональні обчислювальні машини, відноситься до приміщень без підвищеної небезпеки, оскільки відсутні такі фактори:

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

- вогкість;
- струмопровідний пил;
- струмопровідні підлоги;
- висока температура;
- можливість одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, технологічних апаратів і механізмів і металевих корпусів електроустаткування, що мають з'єднання з землею.

Персональний комп'ютер живиться від мережі 220 В змінного струму із частотою 50Гц. Ця напруга небезпечна для життя, тому обов'язкові такі запобіжні заходи:

- перед початком роботи потрібно переконатися, що вимикачі та розетка закріплені та не мають оголених струмопровідних частин;
- при виявленні несправності обладнання та приладів необхідно, не роблячи жодних самостійних виправлень, повідомити людину, відповідальну за обладнання.

До заходів щодо запобігання можливості ураження електричним струмом слід віднести:

- при виконанні монтажних робіт необхідно використовувати тільки справний інструмент, атестований службою КВП;
- з метою захисту від ураження електричним струмом, що виникає між корпусом приладів та інструментом під час проби мережної напруги на корпус, корпуси приладів та інструментів повинні бути заземлені;
- при включеному мережному напрузі роботи на задній панелі повинні бути заборонені;
- усі роботи з усунення несправностей повинен виконувати кваліфікований персонал;
- необхідно постійно стежити за справністю електропроводки.

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						67
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

7.2. Небезпека виникнення пожежі

Найбільш характерною надзвичайною ситуацією для цього виробничого приміщення є пожежа. Пожежна небезпека персональних електронно-обчислювальних машин, обумовлена наявністю у електрообладнанні, що застосовується, горючих ізоляційних матеріалів. Горючими є ізоляція обмоток з'єднувальних проводів та кабелів.

Відповідно до визначення категорій приміщень, будівель та зовнішніх установок із вибухопожежної та пожежної безпеки (НПБ 105-03) виробництва підрозділяються з пожежної та вибухової небезпеки на категорії А, Б, В, Г, Д.

Приміщення з пожежної та вибухової небезпеки відносять до категорії В.

При будівництві будівель та споруд з урахуванням категорії виробництва застосовують будівельні матеріали та конструкції, які поділяються на три групи:

- ті, що згоряють;
- ті що важко згоряють;
- вогнетривкі.

Будівля, в якій знаходиться приміщення, належить до вогнетривких.

Для запобігання пожежі приміщення з ПЕОМ має бути обладнане первинними засобами пожежогасіння: вуглекислотним вогнегасником типу ВВ 2 чи ВВ 5.

При неможливості самостійно загасити пожежу необхідно викликати пожежну команду, після чого повідомити про те, що сталося інженера з техніки безпеки.

У приміщеннях з ПЕОМ підвищено ризик виникнення пожежі. Несправність електрообладнання, освітлення, неправильна їх експлуатація, наявність статичної електрики незадовільний нагляд за пожежними пристроями та виробничим обладнанням може спричинити пожежу. Пожежа

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

на підприємстві завдає великих матеріальних збитків і часто супроводжується нещасними випадками з людьми.

Пожежна безпека включає комплекс організаційних і технічних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки людей, запобігання пожежі, обмеження її поширення, а також створення умови для успішного гасіння пожежі.

Для профілактики пожежі повинні забезпечуватись регулярні перевірки пожежної сигналізації, первинних засобів пожежогасіння; проводитися інструктаж та тренування з дій у разі пожежі; не захаращуватися та не блокуватися евакуаційні виходи; виконуватись вимоги правил технічної експлуатації та правил техніки безпеки під час експлуатації електроустановок; у всіх службових приміщеннях має бути встановлений «План евакуації людей під час пожежі», що регламентує дії персоналу у разі виникнення вогнища загоряння та вказує місця розташування пожежної техніки.

Одна з умов забезпечення пожежної безпеки - ліквідація можливих джерел займання.

У лабораторії джерелами займання можуть бути несправне електроустаткування, несправності в електропроводці, електричних розетках та вимикачах.

Для запобігання виникненню пожежі з цих причин необхідно вчасно виявляти та усувати несправності, проводити плановий огляд та своєчасно усувати всі несправності та несправні електроприлади та не використання несправних електроприладів.

Обігрівання приміщення відкритими електронагрівальними приладами можуть призвести до пожежі, оскільки у приміщенні знаходяться паперові носії.

З метою профілактики пожежі пропонується не використовувати відкриті обігрівальні прилади у приміщенні лабораторії. З метою зменшення ймовірності виникнення пожежі внаслідок короткого замикання необхідно, щоб електропроводка була прихована.

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

З метою запобігання пожежі також пропонується проводити з інженерами, які працюють у лабораторії, протипожежний інструктаж.

У разі виникнення пожежі необхідно відключити електроживлення, викликати по телефону пожежну команду, евакуювати людей із приміщення згідно з планом евакуації та розпочати ліквідацію пожежі вогнегасниками.

За наявності невеликого вогнища полум'я можна скористатися підручними засобами для припинення доступу повітря до об'єкту займання.

У виробничих приміщеннях має бути не менше двох евакуаційних виходів. Будівля, в якій розташовується лабораторія, відповідає вимогам пожежної безпеки. У будівлі встановлено систему охоронно-пожежної сигналізації, є в наявності порошкові вогнегасники та план евакуації, а також встановлено план евакуації із зазначенням напрямків до запасного (евакуаційного) виходу.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи розроблено комп'ютеризовану систему вимірювання статичних параметрів діодів.

Дана система вимірювання статичних параметрів діодів дає можливість не тільки проводити вимірювання параметрів різних класів напівпровідникових діодів, але і при цьому візуально відображати їх основні статичні вольт-амперні характеристики. У ній передбачено можливість підключення до комп'ютера для автоматизації процесу тестування та спрощення документування результатів контролю.

В процесі роботи було виконано огляд існуючих методів вимірювання статичних параметрів напівпровідникових діодів, розроблено автоматизовану систему виміру статичних параметрів діодів різних класів та виконано тестування автоматизованої системи вимірювання статичних параметрів діодів різних класів.

Основною областю застосування системи є проведення вимірювань параметрів статичних напівпровідникових діодів, а також автоматичне відбракування напівпровідникових діодів за заданими параметрами.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		71

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1) М.П. Матвієнко, «Основи електроніки», - Київ: Видавництво Ліра-К, 2021. 361 с.
- 2) І.М. Бондаренко, О.В. Бродін, О.Б. Галат, В.П. Карнаушенко, «Твердотільна електроніка», Харків: ХНУРЕ, 2020. 235 с.
- 3) П.Г. Стахів, В.І. Коруд, О.Є. Гамола, В.Я. Чернівчан, Н.П. Мусихіна, «Основи електроніки з елементами мікроелектроніки», Львів: Видавництво "Магнолія-2006", 2020. 224 с.
- 4) І.М. Бондаренко, О.В. Бородін, В.П. Карнаушенко, «Проектування напівпровідникових приладів та інтегральних схем : навчальний посібник для студентів спеціальностей "Мікро-та наносистемна техніка", "Електроніка", Харків: ХНУРЕ, 2019. 174 с.
- 5) J. H. Leck. Theory of Semiconductor Junction Devices: A Textbook for Electrical and Electronic Engineers. Elsevier Science Press, 2013. 178 p
- 6) Електротехнічні матеріали: Курс лекцій. Частина 1. Діелектричні матеріали. [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів всіх форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.М. Кириленко, К.В. Кириленко. В.М. Головка. — Електронні текстові дані (1 файл: 6,698 Мбайт). — Київ: КПІ ім Ігоря Сікорського, 2021. — 224 с.
- 7) Схемотехніка електронних систем: У 3 кн. Кн. 1 Аналогова схемотехніка та імпульсні пристрої: Підручник / В.І. Бойко, А.М. Гуржій, В.Я Жуйков та ін. – 2-ге вид. допов. І перероб. – К.: Вища шк., 2004. – 366 с.
- 8) Фізична електроніка. Конспект лекцій. Частина І. «Випрямні та спеціальні діоди: основні параметри, особливості функціонування. Діоди надвисоких частот» [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньо-професійними програмами «Електронні прилади та пристрої» та «Електронні компоненти і системи» спеціальності 171 «Електроніка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. Т. В.

					МІМТ.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		72

Семікіна, Н. В. Слободян. - Електронні текстові дані (1 файл 2,53 Мбайт). - Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. - 94 с.

9) Електроніка і мікросхемотехніка: Підручник у 4-х т. / Сенько В.І., Панасенко М.В., Сенько Є.В. та ін. – Харків: Фоліо, 2002. – Т. 2. Аналогові та імпульсні пристрої. – 510 с.

10) Електроніка та мікропроцесорна техніка. Частина 1. Аналогова електроніка : навчальний посібник / Ю.О. Подчашинський, А.Г. Ткачук, Л.О. Чепюк. – Електронні дані. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. – 212 с.

11) Медяний Л.П. Аналогова схемотехніка: Підручник. - К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 177 с.

12) Васильєва Л.Д., Медведенко Б.І., Якименко Ю.І. Напівпровідникові прилади: Підручник. – К.: Політехніка, 2003. – 388 с.

13) ДСТУ ІЕС 60747-1:2009 Приборы полупроводниковые. Часть 1. Основные положения (ІЕС 60747-1:2006, IDT)

14) ДСТУ ІЕС 60747-2:2015 Приборы полупроводниковые. Дискретные приборы и интегральные схемы. Часть 2. Выпрямительные диоды (ІЕС 60747-2:2000, IDT)

15) https://www.tehencom.com/Companies/Keithley/2410_2410-C_SMU/Keithley_2410_2410-C_SMU-u.htm

16) https://www.tehencom.com/Companies/Keithley/2425_2425-C_SMU/Keithley_2425_2425-C_SMU-u.htm

					MIMT.480.002.123 – ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

ДОДАТКИ

Статичні параметри діодів

Таблиця А.1 – Статичні параметри діодів

Термін	Літерні позначення		Визначення
	вітчизняні	міжнародні	
Постійна пряма напруга	$U_{пр}$	U_F	Постійне значення прямої напруги при заданому прямому струмі діода
Імпульсна пряма напруга	$U_{прU}$	U_{FM}	Найбільше миттєве значення прямого напруги, обумовлене імпульсним прямим струмом діода заданого значення
Постійна зворотня напруга	$U_{звор}$	U_R	-
Імпульсна зворотня напруга	$U_{зворU}$	U_{RM}	Найбільше миттєве значення зворотної напруги діода
Середня пряма напруга	$U_{прсер}$	$U_{F(AV)}$	Середнє за період значення прямого напруги діода при заданому середньому прямому струмі
Напруга пробою	$U_{проб}$	$U_{(BR)}$	Значення зворотної напруги, що викликає пробій переходу діода, при якому зворотний струм досягає заданого значення
Постійний прямий струм	$I_{пр}$	I_F	-
Імпульсний прямий струм	$I_{прім}$	I_{FM}	Найбільше миттєве значення прямого струму діода, включаючи повторювані та неповторні перехідні струми
Середній прямий струм	$I_{прсер}$	$I_{F(AV)}$	Середнє за період значення прямого струму діода
Постійний зворотний струм	$I_{звор}$	I_R	-
Імпульсний зворотний струм	$I_{обрімп}$	I_{RM}	Найбільше миттєве значення зворотного струму діода, обумовленого імпульсною зворотною напругою
Пряма потужність розсіювання	$P_{пр}$	P_F	Значення потужності, що розсіюється діодом при протіканні прямого струму
Зворотня потужність розсіювання	$P_{звор}$	P_R	Значення потужності, що розсіюється діодом при протіканні зворотного струму
Середня потужність розсіювання	$P_{сер}$	P, P_{tot}	Середнє за період значення потужності, розсіюється діодом при протіканні прямого та зворотного струмів
Імпульсна розсіювана потужність	P_i	P_M	Найбільше миттєве значення потужності, що розсіюється діодом

Продовження таблиці А.1

Термін	Літерні позначення		Визначення
	вітчизняні	міжнародні	
Загальна ємність	C_D	C_{tot}	Значення ємності між висновками діода за заданого режиму
Ємність переходу	$C_{пер}$	C_j	Загальна ємність діода без ємності корпусу
Ємність корпусу	$C_{кор}$	C_{case}	Значення ємності між выводами корпусу діода за відсутності кристала
Диференційний опір	$r_{диф}$	r	Відношення малого збільшення напруги діода до малого збільшення струму в ньому при заданому режимі
Послідовний опір втрат	r_n	r_s	Сумарний еквівалентний активний опір кристала, контактних з'єднань та выводів діода
Тепловий опір	R_T, R	R_{th}	Відношення різниці ефективної температури переходу і температури в контрольній точці до розсіюється потужності діода в режимі, що встановився
Тепловий опір перехід-довкілля	$R_{мпер-окр}$ $R_{пер-окр}$	R_{thia} $R_{(th)ia}$	Тепловий опір діода у разі коли температурою в контрольній точці є температура навколишнього середовища
Тепловий опір перехід-корпус	$R_{мпер-кор}$ $R_{пер-кор}$	R_{thjc} $R_{(th)jc}$	Тепловий опір діода у разі коли температурою в контрольній точці є температура корпусу діода
Перехідний тепловий опір	Z_T, Z	Z_{th}	Відношення різниці зміни температури переходу і температури в контрольній точці в кінці заданого інтервалу часу, що викликає зміну температури, до стрибкоподібної зміни: потужності діода, що розсіюється, на початку цього інтервалу
Перехідний тепловий опір перехід-довкілля	$Z_{мпер-окр}$ $Z_{пер-окр}$	Z_{thia} $Z_{(th)ia}$	Перехідний тепловий опір діода у разі коли температурою в контрольній точці є температура навколишнього середовища
Перехідний тепловий опір перехід-корпус	$Z_{мпер-кор}$ $Z_{пер-кор}$	Z_{thjc} $Z_{(th)jc}$	Перехідний тепловий опір діода у разі коли температурою в контрольній точці є температура корпусу діода
Індуктивність	L_{II}	L_s	Послідовна еквівалентна індуктивність діода за заданих умов
Ефективний час життя нерівноважних носіїв зарядів	$\tau_{эфф}$	τ_p, τ_n	Величина, що характеризує швидкість зменшення концентрації нерівноважних носіїв заряду діода внаслідок рекомбінації в обсязі та на поверхні напівпровідника
Накопичений заряд	$Q_{НК}$	Q_s	Заряд електронів або дірок в основі діода (або в і-області р-і-п-структури), накопичений при протіканні прямого струму

Закінчення таблиці А.1

Термін	Літерні позначення		Визначення
	вітчизняні	міжнародні	
Заряд відновлення	$Q_{вос}$	Q_r	Накопичений заряд діода, що витікає у зовнішній ланцюг при перемиканні діода із заданого прямого струму на задану зворотну напругу
Час зворотного відновлення	$t_{вособр}$	t_{rr}	Час перемикання діода із заданого прямого струму на задану зворотну напругу від моменту проходження струму через нульове значення до досягнення зворотним струмом заданого значення
Час прямого відновлення	$t_{воспр}$	t_{fr}	Час, протягом якого відбувається включення діода та пряма напруга на ньому встановлюється від значення рівного нулю до заданого встановленого значення

Технічні характеристики засобів вимірювання

Таблиця Б.1 – Технічні характеристики засобів вимірювання

Моделі	2400	2410	2420	2425	2430	2440
Особливості	Загального призначення	Високовольтний	3A	Потужний	1000 Вт в імпульсному режимі	5A
Максимальна вхідна потужність	20 Вт	20 Вт	60 Вт	100 Вт	100 Вт	50 Вт
Джерело імпульсного струму	-	-	-	-	От 500 нА до 10, 55 А	-
Діапазон напруг	0,2, 2, 20, 200 В	0,2, 2, 20, 1000 В	0,2, 2, 20, 60 В	0,2, 2, 20, 100 В	0,2, 2, 20, 100 В	0,2, 2, 20, 40 В
Точність встановлення джерела напруги	0,02 %	0,02 %	0,02 %	0,02 %	0,02 %	0,02 %
Точність вимірювання напруги	0,015 %	0,015 %	0,015 %	0,015 %	0,015 %	0,015 %
Діапазони струмів	1, 10, 100 мкА 1, 10, 100 мА 1А	1, 10, 100 мкА 1, 10, 100 мА 1А	10, 100 мкА 1, 10, 100 мА 1А, 3А	1, 10, 100 мкА 1, 10, 100 мА 1А	1, 10, 100 мкА 1, 10, 100 мА 1А	1, 10, 100 мкА 1, 10, 100 мА 1А
Точність встановлення джерела струму	0,045 %	0,045 %	0,045 %	0,045 %	0,045 %	0,045 %
Точність вимірювання струму	0,035 %	0,035 %	0,035 %	0,035 %	0,035 %	0,035 %
Діапазон виміру опору	20, 200 Ом 2, 20, 200 кОм 2, 20, 200 МОм	20, 200 Ом 2, 20, 200 кОм 2, 20, 200 МОм	20, 200 Ом 2, 20, 200 кОм 2, 20 МОм	2, 20, 200 Ом 2, 20, 200 кОм 2, 20 МОм	2, 20, 200 Ом 2, 20, 200 кОм 2, 20 МОм	20, 20, 200 Ом 2, 20, 200 кОм 2, 20 МОм
Точність виміру опору	0,06%	0,07%	0,06%	0,06%	0,06%	0,06%
Область застосування	Резистори Діоди Оптичні компоненти	Варистор Високовольтні діоди та прилади захисту	Потужні резистори Термістори Сонячні елементи Батареї Діоди	Потужні НП та компоненти Прилади Конвертори	Потужне імпульсне тестування Варистор та прилади захисту	5А- діод лазерного накачування