

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ МИХАЙЛА ОСТРОГРАДСЬКОГО
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ
ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ



МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
З НАВЧАЛЬНОЇ ДИСЦИПЛІНИ
«ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ ДЕННОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 123 – «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ
«КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»
ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ «БАКАЛАВР»

КРЕМЕНЧУК 2022

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Основи електроніки» для студентів денної форми навчання зі спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія» освітньо-професійної програми «Комп'ютерна інженерія» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладач к. т. н., доц. О. О. Юрко

Рецензент к. т. н., доц. Д. В. Кухаренко

Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Затверджено методичною радою Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

Протокол № ____ від ____ _____ 2022 року

Голова методичної ради

проф. В. В. Костін

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Перелік лабораторних робіт.....	5
Лабораторна робота № 1 Дослідження простих електричних кіл постійного струму	5
Лабораторна робота № 2 Дослідження джерел постійного струму	9
Лабораторна робота № 3 Дослідження складних електричних кіл	13
Лабораторна робота № 4 Експериментальна перевірка спеціальних методів еквівалентних перетворень електричних кіл	17
Лабораторна робота № 5 Дослідження енергетичних співвідношень в електричних колах	21
Лабораторна робота № 6 Дослідження пасивних елементів у колі синусоїдального струму	26
Лабораторна робота № 7 Послідовний коливальний контур.....	30
Лабораторна робота № 8 Паралельний коливальний контур.....	34
Лабораторна робота № 9 Визначення ширини забороненої зони напівпровідника	37
Лабораторна робота № 10 Дослідження характеристик напівпровідникових діодів	45
Лабораторна робота № 11 Дослідження польового транзистора з керованим р-п переходом	52
Лабораторна робота № 12 Дослідження польового транзистора з ізольованим затвором	58
Лабораторна робота № 13 Дослідження характеристик світлодіодів ...	65
Лабораторна робота № 14 Дослідження характеристик резисторної оптопари	69
Лабораторна робота № 15 Сегментні знакові індикатори.....	74
Критерії оцінювання знань.....	79
Список літератури	80

ВСТУП

Метою викладання навчальної дисципліни «Основи електроніки» є вивчення: загальних принципів побудови та функціонування електронних апаратів та систем передачі та перетворення інформації; структури та методів аналізу електронних кіл, на основі яких будуються пристрої передачі та перетворення інформації. Навчальний предмет ґрунтується на знаннях з навчальних курсів: «Фізика», «Вища математика».

Ці лабораторні роботи відповідають робочій навчальній програмі й охоплюють основні питання змістових модулів «Електронні кола та сигнали» та «Елементи електронних приладів».

Під час підготовки та захисту лабораторних робіт студент повинен вивчити відповідні розділи наведеної літератури та заздалегідь приготувати необхідні таблиці й провести попередні розрахунки.

Оброблення результатів і графічні побудови рекомендовано проводити за допомогою математичного пакета Mathcad.

Вивчення навчальної дисципліни надає можливість здобути компетентності, потрібні для подальшої професійної діяльності:

ІК. Здатність розв'язувати складні спеціальні задачі та практичні проблеми під час професійної діяльності в комп'ютерній галузі або навчання, що передбачає застосування теорій та методів комп'ютерної інженерії і характеризується комплексністю та невизначеністю умов.

Z1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

Z2. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

Z3. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

Z4. Здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово.

P11. Здатність оформляти отримані робочі результати у вигляді презентацій, науково-технічних звітів.

P13. Здатність вирішувати проблеми у галузі комп'ютерних та інформаційних технологій, визначати обмеження цих технологій.

ПЕРЕЛІК ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

Лабораторна робота № 1

Тема. Дослідження простих електричних кіл постійного струму

Мета: експериментальне дослідження еквівалентних перетворень простих резистивних кіл постійного струму.

1 Короткі теоретичні відомості

Властивості послідовного та паралельного з'єднань резистивних елементів наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

	Послідовне з'єднання	Паралельне з'єднання
Схеми		
Струми	$I = I_1 = I_2$	$I = I_1 + I_2$
Напруги	$U = U_1 + U_2$	$U = U_1 = U_2$
Опори	$R = R_1 + R_2$	$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 = Y_1 + Y_2 = Y,$ де $Y=1/R$ – провідність резистора

2 Порядок виконання роботи

2.1 Скласти електричне коло для дослідження характеристик послідовного з'єднання резистивних елементів за схемою, наведеною на рис. 1.1.

2.2 Повзунами резисторів виставити довільні значення опорів ділянок електричного кола (положення регуляторів мають знаходитись у межах від 0,25 до 0,75 повного ходу) та виконати вимірювання струмів і напруг за

максимальним значенням задавальної напруги джерела U_{Γ} . Результати вимірювань занести до табл. 1.2.

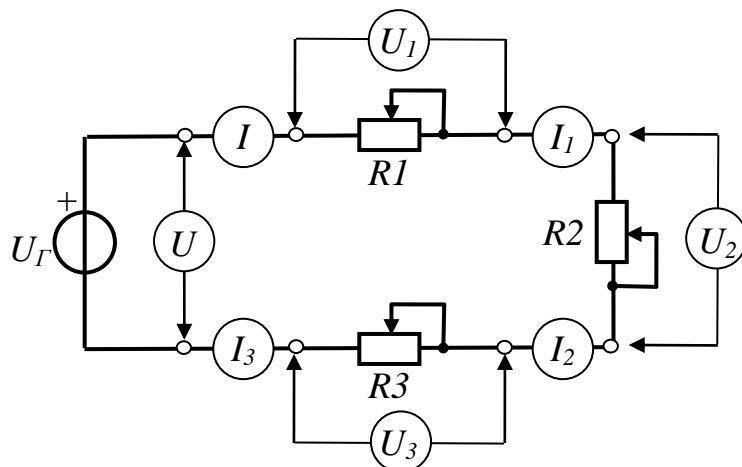


Рисунок 1.1 – Схема для дослідження послідовного з'єднання резистивних елементів

Таблиця 1.2

Виміряно								Обчислено			
$U_0, \text{В}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_3, \text{В}$	$I_0, \text{А}$	$I_1, \text{А}$	$I_2, \text{А}$	$I_3, \text{А}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$	$R_{\text{заг}}, \text{Ом}$

2.3 Скласти електричне коло для дослідження паралельного з'єднання резистивних елементів за схемою, наведеною на рис. 1.2. Виконати вимірювання всіх струмів і напруг, позначених на рис. 1.2., за рекомендаціями, аналогічними до п. 2.2. Результати занести до табл. 1.3.

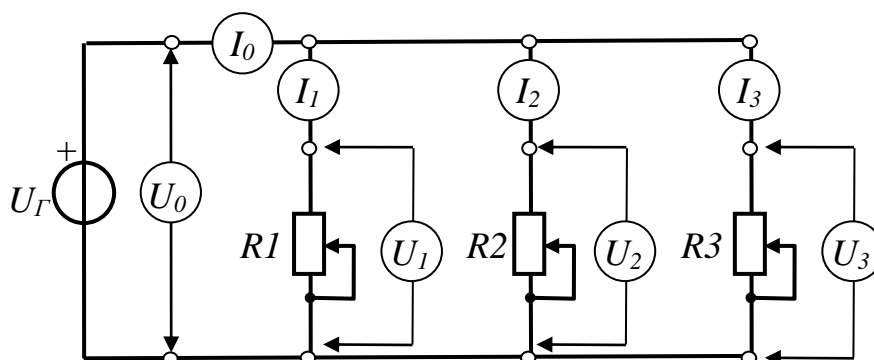


Рисунок 1.2 – Схема для дослідження паралельного з'єднання резистивних елементів

Таблиця 1.3

Виміряно								Обчислено			
$U_0, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$I_0, А$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_{заг}, Ом$

2.4 Скласти електричне коло для дослідження змішаного з'єднання резистивних елементів за схемою, наведеною на рис. 1.3. Виконати вимірювання всіх струмів і напруг, позначених на рис. 1.2., за рекомендаціями, аналогічними до п. 2.2. Результати занести до таблиці 1.4.

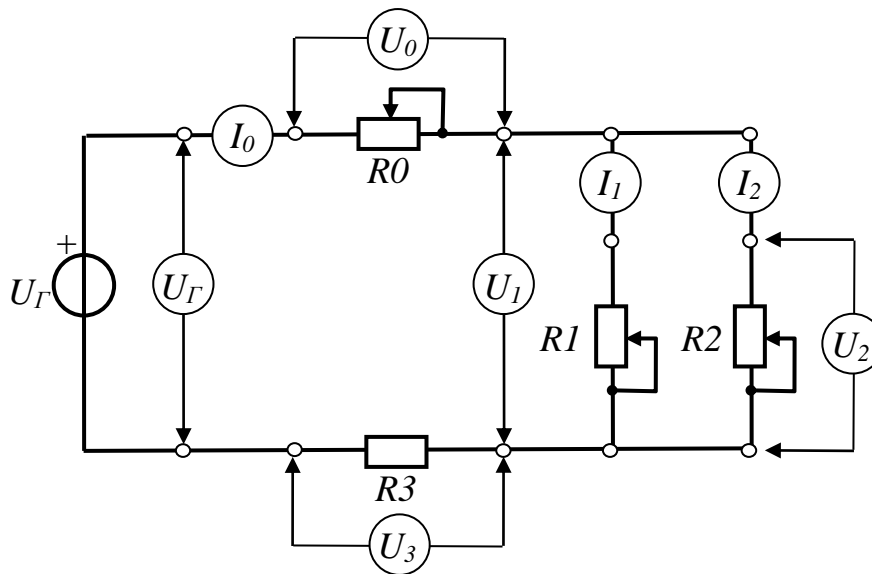


Рисунок 1.3 – Схема для дослідження змішаного з'єднання резистивних елементів

Таблиця 1.4

Виміряно								Обчислено				
$U_Г, В$	$U_0, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$I_0, А$	$I_1, А$	$I_2, А$	$R_0, Ом$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R_{заг}, Ом$

3 Оброблення результатів

3.1 За даними табл. 1.2 за допомогою закону Ома обчислити величини опорів резисторів R_1 , R_2 , R_3 та еквівалентний опір усього з'єднання двома способами:

а) $R_{\text{заг}} = R_1 + R_2 + R_3$;

б) $R_{\text{заг}} = U_0/I_0$.

Порівняти одержані значення для всіх режимів вимірювання.

3.2 За даними табл. 1.3 обчислити величини опорів гілок схеми та величину еквівалентного опору всієї схеми двома способами:

а) $1/R_{\text{заг}} = (1/R_1) + (1/R_2) + (1/R_3)$;

б) $R_{\text{заг}} = U_0/I_0$.

3.3 За даними табл. 1.4 для змішаного з'єднання обчислити:

– опори всіх гілок схеми;

– вхідний опір двополюсника двома способами:

а) користуючись властивостями послідовного та паралельного з'єднань;

б) за формулою $R_{\text{заг}} = U_{\Gamma}/I_0$.

4 Зміст звіту

4.1 Назва й мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати оброблення експериментів у вигляді таблиць.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Послідовне та паралельне з'єднання двополюсників.

5.2 Еквівалентний опір послідовного та паралельного з'єднань резистивних елементів.

5.3 Обчислення напруги на одному з двох послідовно з'єднаних резисторів, якщо відома загальна напруга.

5.4 Обчислення струму в одному з двох паралельно з'єднаних резисторів, якщо відомим є загальний струм.

5.5 Послідовне та паралельне з'єднання ємностей. Розподіл зарядів і напруг.

5.6 Обчислення еквівалентної ємності послідовного та паралельного з'єднань конденсаторів.

5.7 Резистивні та ємнісні ділянки напруги.

5.8 Дільники струму. Шунти.

5.9 Визначення еквівалентних кіл.

5.10 Зміст методу згортання кіл.

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 2

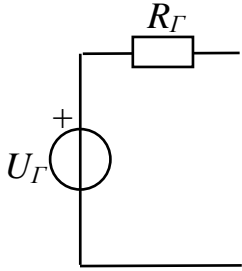
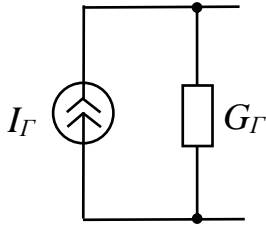
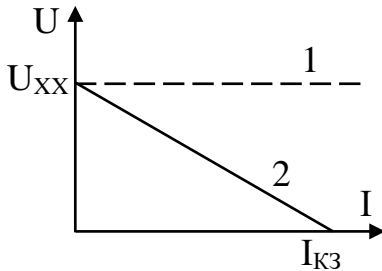
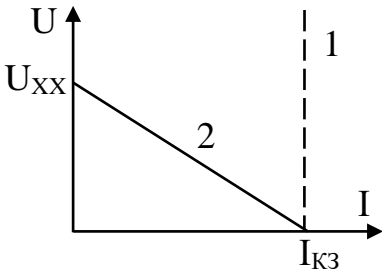
Тема. Дослідження джерел постійного струму

Мета: експериментальне дослідження еквівалентних перетворень джерел постійної напруги.

1 Короткі теоретичні відомості

Основні характеристики джерел і співвідношення для еквівалентного перетворення наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

	Джерело напруги	Джерело струму
Реальне		
Ідеальне	$R_G = 0$	$G_G = 0$
Співвідношення під час перетворення	$U_G = I_G / G_G,$ $R_G = 1 / G_G$	$I_G = U_G / R_G,$ $G_G = 1 / R_G$
Вольт-амперні характеристики	 1 – ідеальне джерело; 2 – реальне джерело	 1 – ідеальне джерело; 2 – реальне джерело

Приклад застосування перетворення джерел для спрощення схеми поетапно наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2

№	Розрахункові формули	Схеми перетворення
1	Вихідна схема	
2	$I_{G1} = U_{G1}/R_{G1},$ $G_{G1} = 1/R_{G1},$ $I_{G2} = U_{G2}/R_{G2},$ $G_{G2} = 1/R_{G2}$	
3	$I_G = I_{G1} + I_{G2},$ $G_G = G_{G1} + G_{G2}$	
4	$U_G = I_G/G_G,$ $R_G = 1/G_G$	

2 Порядок виконання роботи

2.1 Визначити параметри джерел постійного струму U_{G1} та U_{G2} (у положенні максимуму). Спочатку виміряти напругу холостого ходу U_{XX} джерел (за відсутності навантаження) за допомогою вольтметра. Дані занести до табл. 2.3.

2.2 Скласти електричне коло за схемою, наведеною на рис. 2.1, почергово для кожного джерела.

Таблиця 2.3

Джерело	Виміряно			Обчислено	
	$U_{XX}, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$R_{\Gamma}, \text{Ом}$	$U_{\Gamma}, \text{В}$
$U_{\Gamma 1}$		0,03			
$U_{\Gamma 2}$		0,03			

Установити у колі струм $I = 0,03 \text{ А}$, поступово зменшуючи опір резистора $R1$, починаючи з максимального. Вимірні значення напруги U занести до табл. 2.3.

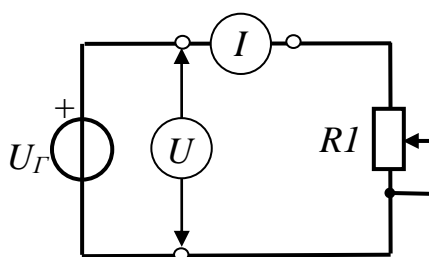


Рисунок 2.1 – Схема для дослідження характеристики джерела напруги

2.3 Скласти електричне коло для дослідження властивостей послідовного з'єднання джерел постійної напруги за схемою, наведеною на рис. 2.2.

Стан джерел має бути саме тим, як і в попередніх вимірах, тобто в положенні максимуму. Змінний резистор $R2$ увімкнути на максимальний опір.

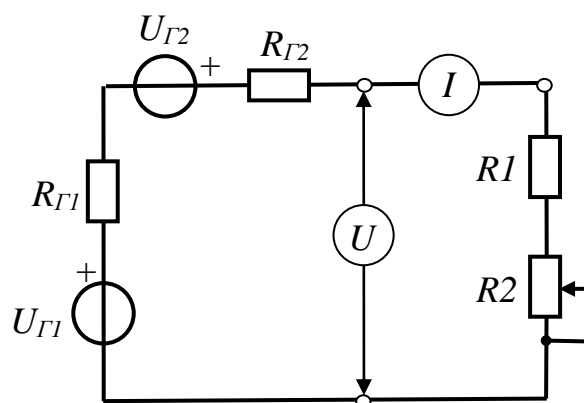


Рисунок 2.2 – Схема для дослідження послідовного з'єднання джерел

2.4 Занести показання вимірювальних приладів загальних струму I та напруги U до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

З'єднання джерел	Виміряно		Обчислено		
	I, А	U, В	R _e , Ом	U _e , В	U _e ^{II} , В
Послідовне					
Паралельне					

2.5 Скласти електричне коло для досліджень властивостей паралельного з'єднання джерел постійної напруги за схемою, наведеною на рис. 2.3. Попередньо омметром виміряти опори резисторів R_1 і R_2 .

Стан джерел опору резистора має бути саме тим, як і в попередньому вимірі – у положенні максимуму.

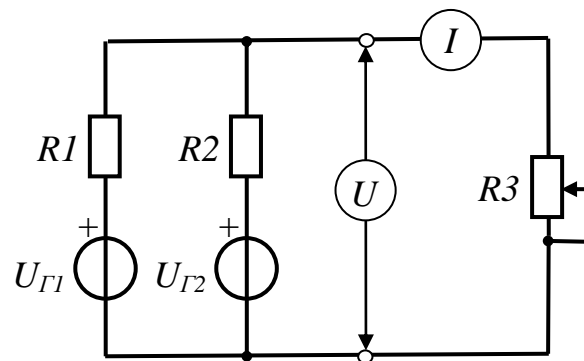


Рисунок 2.3 – Схема для дослідження паралельного з'єднання джерел

2.6 Повторити вимірювання, що були передбачені п. 2.4. Результати занести до табл. 2.4.

3 Оброблення результатів

3.1 За даними табл. 2.3 обчислити параметри джерел постійної напруги за співвідношеннями:

$$U_G = U_{XX}; R_G = (U_G - U)/I.$$

3.2 Обчислити значення величини внутрішніх опорів і задавальних напруг джерел, які будуть еквівалентними послідовному та паралельному з'єднанням джерел постійної напруги U_{G1} та U_{G2} двома способами:

– за даними табл. 2.3:

а) $U_e = U_{G1} + U_{G2}$ та $R_e = R_{G1} + R_{G2}$ – для послідовного з'єднання;

б) $U_e = (U_{G1}/(R_{G1} + R_1) + U_{G2}/(R_{G2} + R_2)) / [1/(R_{G1} + R_1) + 1/(R_{G2} + R_2)]$ та $1/R_e = 1/(R_{G1} + R_1) + 1/(R_{G2} + R_2)$ – для паралельного з'єднання джерел;

– з урахуванням даних із табл. 2.4:

а) $U_e^H = U + I \cdot (R_{Г1} + R_{Г2})$ – для послідовного з'єднання;

б) $U_e^H = U + I \cdot [1/(R_{Г1} + R_1) + 1/(R_{Г2} + R_2)]$ – для паралельного з'єднання

джерел.

4 Зміст звіту

4.1 Назва та мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати оброблення експериментів у вигляді таблиць.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Наведіть ВАХ ідеальних і реальних джерел напруги та струму.

5.2 Як графічно визначити струм короткого замикання та напругу холостого ходу?

5.3 Наведіть еквівалентні перетворення реальних джерел напруги та струму.

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 3

Тема. Дослідження складних електричних кіл постійного струму

Мета: експериментальне дослідження методів аналізу та розрахунків складних електричних кіл.

1 Короткі теоретичні відомості

У методі вузлових напруг (МВН) рівняння складаються відносно вузлових напруг, а їх кількість на одиницю менше, ніж кількість вузлів: $n_B - 1$.

У методі контурних струмів (МКС) рівняння складаються відносно незалежних контурів, а їхня кількість дорівнює кількості хорд: $n_X = n_T - (n_B - 1)$, де n_T – кількість гілок. Для їх виявлення необхідно скласти дерево графа схеми.

Методи еквівалентного генератора (МЕГ) та накладання (МН) зручно використовувати, коли необхідно знайти одну невідому величину.

У МЕГ виділяється окрема гілка з невідомим струмом чи напругою, яка вважається навантаженням усієї решти кола. Це коло замінюється еквівалентним генератором струму чи напруги.

У разі застосування МН складаються схеми заміщення окремо для кожного незалежного джерела, де всі інші джерела вважаються вимкненими. У кожній схемі знаходяться часткові невідомі струм чи напруга, які є складовими шуканої результуючої невідомої величини.

2 Порядок виконання роботи

2.1 Скласти електричне коло за схемою, наведеною на рис. 3.1. Виміряти й занести до табл. 3.1 величини струмів у гілках і напруг на всіх елементах схеми. Обидва джерела мають бути ввімкненими та встановленими на максимальні значення напруги.

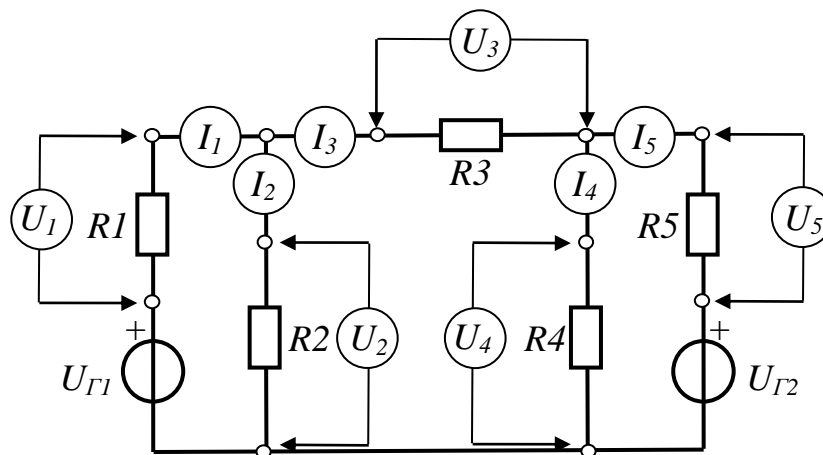


Рисунок 3.1 – Схема для дослідження складних електричних кіл

Таблиця 3.1

Номер гілки схеми	Характеристики гілок				Струми гілок, які обчислені за			
	Виміряно			Обчисл. R, Ом	МКС	МВП	МЕГ	МН
	U, В	U _Г , В	I, А		I, А	I, А	I, А	I, А
1								
2		–						
3		–						
4		–						
5								

Позначити на робочій схемі звіту дійсні напрями струмів і напруг, користуючись для їх визначення або вимірювальними приладами, або законом струмів Кірхгофа (ЗСК).

2.2 Відповідно до результатів аналізу, що був виконаний у п. 2.1, задатися напрямком контурних струмів і визначити, які з виміряних струмів будуть контурними. Їх значення занести до табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Контурні струми			Вузлові потенціали		Часткові струми та напруги				Режими КЗ та ХХ	
I_{11}, A	I_{22}, A	I_{33}, A	U_1, B	U_2, B	I', A	U', B	I'', A	U'', B	U_{XX}, B	$I_{KЗ}, A$

2.3 Узявши за вказівкою викладача потенціал одного з вузлів за нульовий, виміряти відносно нього потенціали решти вузлів, визначивши їх полярність і нумерацію (1 та 2). Результати занести до табл. 3.2.

2.4 Вимикаючи по чергово джерела напруги, виміряти в одній вибраній гілці схеми часткові струми та напруги, які створюються кожним джерелом окремо (I', U' – від першого джерела, а I'', U'' – від другого). Результати занести до табл. 3.2.

2.5 Виміряти напругу холостого ходу для гілки схеми, яку визначить викладач. Для цього вибрану гілку розривають і в місце розриву вмикають вольтметр. Результати занести до табл. 3.2.

2.6 Виміряти величину струму короткого замкнення в гілці, яка досліджувалась у п. 2.5. Для цього резистор у визначеній гілці замикають амперметром. Результат вимірювання занести до табл. 3.2.

3 Оброблення результатів

3.1 За даними, одержаними в п. 2.1, обчислити величини опорів резисторів у кожній гілці схеми й занести до табл. 3.1.

3.2 Користуючись даними табл. 3.2, обчислити величини струмів у гілках схеми методами контурних струмів (МКС) і вузлових потенціалів (МВП), а для

методів накладання (МН) та еквівалентного генератора (МЕГ) тільки для тієї гілки, яка була досліджена за допомогою методів холостого ходу та короткого замкнення. Одержані розрахункові дані занести до табл. 3.1 і порівняти між собою та експериментальними даними.

4 Зміст звіту

4.1 Назва й мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати оброблення експериментів у вигляді таблиць.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 У чому полягає суть методу контурних струмів?

5.2 Як перейти від контурних струмів до реальних струмів гілок схеми?

5.3 Який контур має назву незалежного?

5.4 Чим визначають мінімальну кількість рівнянь, що має бути складеною для розрахунків струмів у всіх гілках схеми за методом контурних струмів?

5.5 Чим визначають мінімальну кількість рівнянь, що має бути складеною для розрахунків струмів у всіх гілках схеми за методом вузлових потенціалів?

5.6 Як за знайденими значеннями вузлових потенціалів визначити величини струмів у гілках схеми?

5.7 Для яких електричних кіл діє принцип накладання?

5.8 Як урахують напрямки часткових струмів під час визначення повного струму?

5.9 Чому принцип накладання не може бути використаним для потужностей?

5.10 У яких випадках використання методу еквівалентного генератора є доцільним?

5.11 У чому полягає суть методу еквівалентного генератора?

5.12 Як за допомогою експериментів визначити параметри еквівалентного генератора?

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 4

Тема. Експериментальна перевірка спеціальних методів еквівалентних перетворень електричних кіл

Мета: експериментальна перевірка методів перетворення «трикутника» опорів на еквівалентну «зірку» та методу винесення джерела напруги за вузол схеми.

1 Короткі теоретичні відомості

Перетворення «зірка»—«трикутник» буде еквівалентним, якщо струми зовнішніх гілок I_1, I_2, I_3 та напруги U_{12}, U_{23}, U_{31} залишаться незмінними (рис. 4.1).

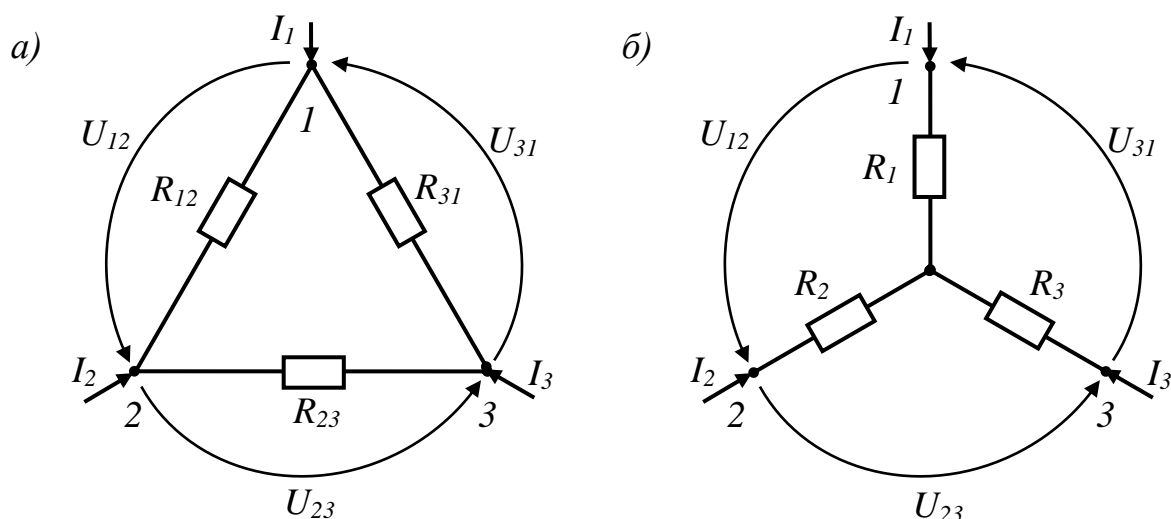


Рисунок 4.1 – Схеми еквівалентних перетворень «трикутник» (а) – «зірка» (б)

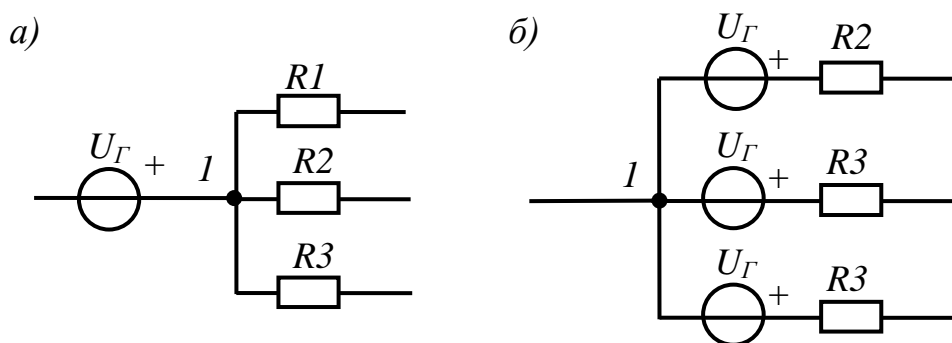


Рисунок 4.2 – Унесення ідеального джерела напруги за вузол

Опори сторін «трикутника» R_{12}, R_{23}, R_{31} можна перерахувати в опори променів еквівалентної «зірки» R_1, R_2, R_3 за формулами:

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}, R_3 = \frac{R_{31}R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}. \quad (4.1)$$

Ідеальне джерело напруги U_G можна перенести за вузол 1 (рис. 4.2,а), якщо у кожному гілку за вузлом увімкнути таке ж саме джерело U_G (рис. 4.2,б).

2 Порядок виконання роботи

2.1 Виміряти омметром максимальні опори трьох змінних резисторів.

2.2 Скласти схему для дослідження з'єднання «трикутник» за рис. 4.3.

На місце резисторів R_{12} , R_{23} та R_{31} поставити відповідно резистори, параметри яких були визначені у п. 2.1. На джерелі живлення встановити максимальне значення напруги.

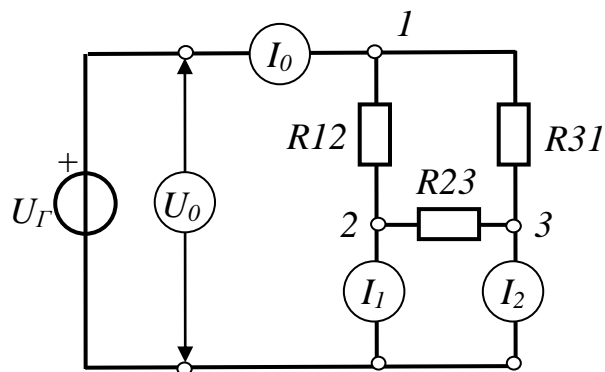


Рисунок 4.3 – Схема для дослідження з'єднання «трикутник»

2.3 Виміряти струми та напруги відповідно до рис. 4.3. Занести показання всіх вимірювальних приладів до табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Схема	Опори гілок, Ом						Виміряно			
	R12	R31	R23	R1	R2	R3	U_G , В	I_0 , А	I_1 , А	I_2 , А
«Трикутник»				–	–	–				
«Зірка»	–	–	–							

2.4 За допомогою формул переходу від «трикутника» опорів до еквівалентної «зірки» обчислити величини опорів променів «зірки» R_1 , R_2 та R_3 (п. 3.1). За допомогою омметра виставити опори резисторів R_1 , R_2 та R_3 такими, що дорівнюють обчисленим опорам променів «зірки».

2.5 Скласти схему для дослідження з'єднання «зіркою» за рис. 4.4.

2.6 За допомогою джерела U_{Γ} установити значення струму I_0 таким, що дорівнює значенню цього струму в досліді п. 2.3, і занести показання всіх вимірювальних приладів до табл. 4.1.

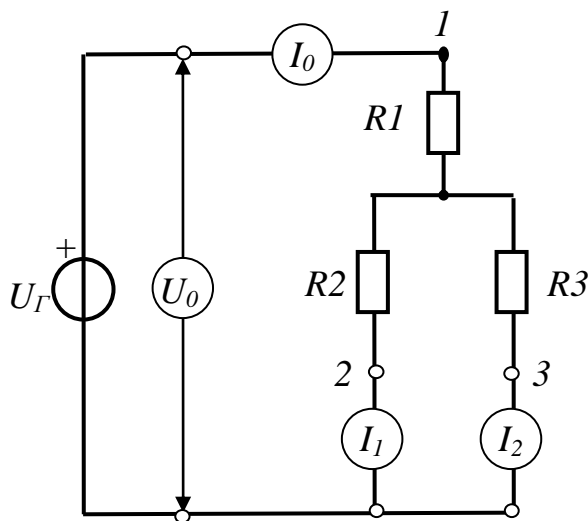


Рисунок 4.4 – Схема для дослідження з'єднання «зірка»

2.7 Скласти схему досліду за рис. 4.5. Напругу джерела живлення U_{Γ} установити рівною 5В за допомогою вольтметра. Змінні резистори ввімкнуті як постійні з максимальним опором.

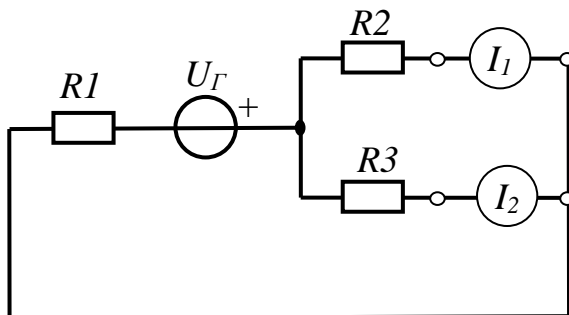


Рисунок 4.5 – Схема досліду до перетворення

2.8 Виміряти значення струмів I_1 , I_2 та напруги U_{R1} і занести до табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Схема	U_{Γ} , В	I_1 , А	I_2 , А	U_{R1} , В
Рис. 4.2				
Рис. 4.3				

2.9 Скласти схему досліду за рис. 4.6. Напруги джерел живлення U_{Γ} встановити однаковими: по 5 В за допомогою вольтметра.

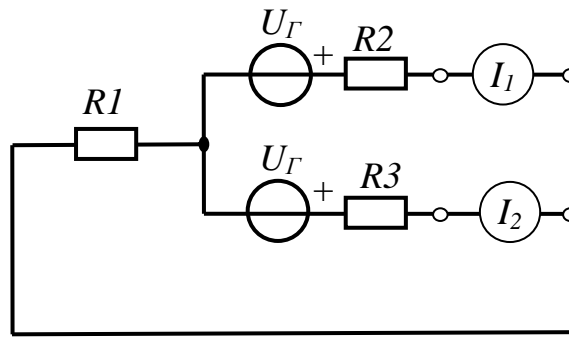


Рисунок 4.6 – Схема після внесення генератора за вузол

2.10 Виміряти значення струмів I_1 , I_2 та напруги U_{R1} та занести до табл. 4.2.

3 Оброблення результатів

3.1 За даними, одержаними в п. 2.1, обчислити величини опорів променів еквівалентної «зірки» за формулами 4.1 та занести до табл. 4.1.

3.2 Порівняти між собою значення однойменних струмів і напруг у схемах із «трикутником» та «зіркою» опорів і пересвідчитись у виконанні принципу еквівалентності заміни.

3.3 За даними табл. 5.3. порівняти між собою значення однойменних струмів та напруг і зробити висновки про виконання принципу еквівалентності заміни.

4 Зміст звіту

4.1 Назва й мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати оброблення експериментів у вигляді таблиць.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 У чому полягає суть принципу еквівалентності заміни?

5.2 Наведіть формули переходу від «трикутника» до еквівалентної «зірки» для резисторів, індуктивностей та ємностей.

5.3 Наведіть формули переходу від «зірки» до еквівалентного «трикутника» для резисторів, індуктивностей та ємностей.

5.4 У чому полягає суть принципу винесення джерела напруги за вузол

схеми? Наведіть схемні приклади такої заміни.

5.5 У чому полягає суть принципу внесення джерела струму до контурів схеми? Наведіть схемні приклади такої заміни.

5.6 За яких обставин доцільно використовувати перетворення «зірки» на еквівалентний «трикутник» та навпаки?

5.7 Коли використовують методи винесення джерел напруги за вузол і внесення джерел струму до контурів схеми?

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 5

Тема. Дослідження енергетичних співвідношень в електричних колах

Мета: експериментальна перевірка теореми Телледжена та балансу потужностей; експериментальне дослідження режиму передавання максимальної потужності від джерела до навантаження.

1 Короткі теоретичні відомості

Теорема Телледжена: сума добутків напруг і струмів усіх гілок схеми, яка задовольняє законам Кірхгофа, дорівнює нулю:

$$\sum_{K=1}^n U_K I_K = 0,$$

де n – кількість гілок графа.

Баланс потужностей: сума потужностей, які віддають незалежні джерела в коло, дорівнює сумі потужностей, які споживають пасивні елементи кола.

2 Порядок виконання роботи

2.1 Визначити параметри джерела постійного струму U_G (у положенні максимуму). Спочатку виміряти напругу холостого ходу U_{XX} джерела (за відсутності навантаження) за допомогою вольтметра. Дані занести до табл. 5.1.

2.2 Скласти електричне коло за схемою, наведеною на рис. 5.1. Установити у колі струм $I = 0,03$ А, поступово зменшуючи опір резистора R_1 ,

починаючи з максимального. Виміряне значення напруги U занести до табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Виміряно			Обчислено	
$U_{XX}, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U, \text{В}$	$R_{\Gamma}, \text{Ом}$	$U_{\Gamma}, \text{В}$
	0,03			

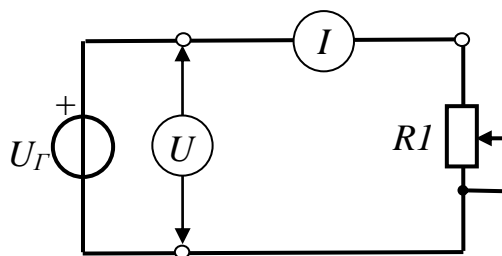


Рисунок 5.1 – Схема для визначення параметрів джерела постійної напруги

2.3 Скласти електричне коло для дослідження оптимальних умов передавання потужності від джерела напруги до навантаження за рис. 5.2. На місці джерела напруги використати кероване джерело постійної напруги, яке було досліджено у п. 2.1. Резистор R_1 використовується як внутрішній опір джерела живлення R_{Γ} .

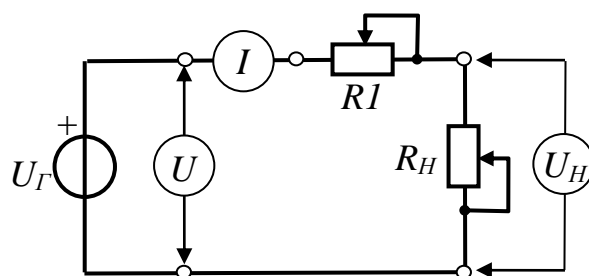


Рисунок 5.2 – Схема для дослідження оптимальних умов передавання потужності

2.4 Регулятором виставити $R_H = 0$, а резистор R_1 – максимальним. Вивести вихідну напругу джерела U_{Γ} до максимального рівня.

Увімкнути джерело. Поступово зменшуючи опір R_1 , виставити струм кола на рівні $I = 30 \text{ мА}$ – значення струму короткого замкнення – й занести до табл. 5.2.

2.5 Виставити максимальний опір резистора навантаження R_H . Поступово збільшувати опір резистора R_H до максимального значення, і занести до табл. 5.2 показання всіх вимірювальних приладів за чотирьох довільних положень регулятора.

Таблиця 5.2

Регулятор	Виміряно			Обчислено		
	I, А	U, В	U_H , В	R_H , Ом	P_G , Вт	P_H , Вт
min						
1						
2						
3						
4						
max						

2.3 Скласти схему для експериментальної перевірки балансу потужностей у колі постійного струму за рис. 5.3. На місце U_G поставити джерело напруги, зовнішня характеристика якого досліджувалась у п. 2.1.

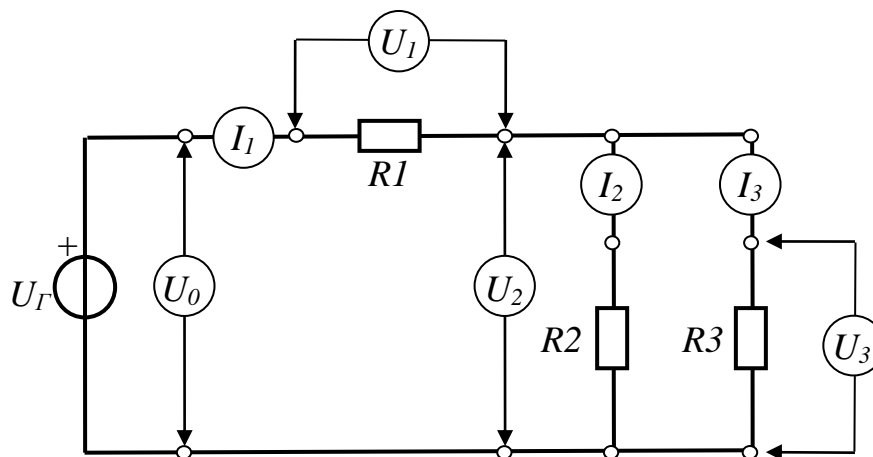


Рисунок 5.3 – Схема для перевірки балансу потужностей у колі постійного струму

2.4 Виставити опори всіх резисторів максимальними. Увімкнути джерело живлення та встановити максимальний рівень його вихідної напруги. Виміряти значення струмів усіх гілок схеми та напруги на всіх елементах, які позначені на рис. 5.3. Дані занести до табл. 5.3.

Таблиця 5.3.

Виміряно							Обчислені опори, Ом			
$U_0, В$	$U_1, В$	$U_2, В$	$U_3, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	R_1	R_2	R_3	R_{Γ}

2.5 Замінити панель стенда на № 3, яка містить реактивні елементи.

2.6 Виміряти активний опір котушки індуктивності R_K .

2.7 Скласти схему для перевірки балансу потужностей у колах змінного струму за рис. 5.4. Для схеми використати джерело змінної напруги U_{Γ} .

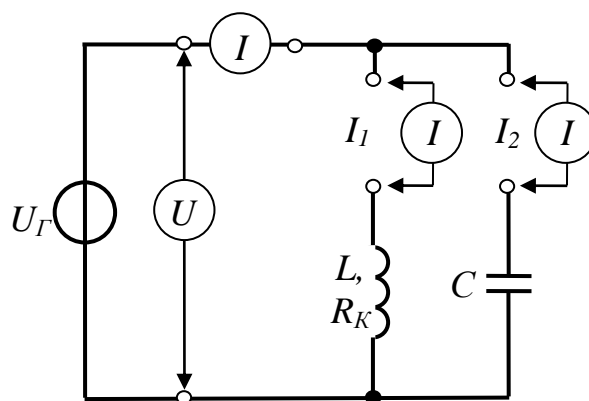


Рисунок 5.4 – Схема для перевірки балансу потужностей у колах змінного струму

2.8 Увімкнути джерело та виставити довільне значення напруги на частоті $f = 1$ кГц. Виміряти значення струмів усіх гілок схеми та напруги на всіх елементах, які позначені на рис. 5.4. Дані занести до табл. 5.4.

Збільшити частоту генератора напруги до $f = 5$ кГц і зробити аналогічні вимірювання. Дані занести до табл. 5.4.

Таблиця 5.4

$f, кГц$	Виміряно				Обчислено					
	$U, В$	$I, А$	$I_1, А$	$I_2, А$	$R, Ом$	$X_C, Ом$	$X_L, Ом$	$S_{\Gamma}, В \cdot А$	$S_{\Gamma}, В \cdot А$	
1										
5										

3 Оброблення результатів

3.1 За даними табл. 5.1 розрахувати параметри джерела постійної напруги:

$$U_G = U_{XX}; R_G = (U_G - U)/I.$$

3.2 За даними табл. 5.2 обчислити величини:

– еквівалентний внутрішній опір джерела: $R_E = R_G + R_I$,

де $R_I = (U - U_H)/I$;

– опір навантаження: $R_H = U_H/I$;

– потужність у навантаженні: $P_H = U_H \cdot I$;

– потужність генератора: $P_G = U_G \cdot I$.

Побудувати графіки залежностей: $P_G = f(R_H)$, $P_H = f(R_H)$, $I = f(R_H)$.

3.3 За даними табл. 5.3 обчислити величини опорів усіх резисторів схеми та перевірити виконання балансу потужностей $P_G = P_H$,

де $P_G = U_0 \cdot I_1$, $P_H = \sum(I_K^2 \cdot R_K) = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3$.

3.4 За даними табл. 5.4 обчислити параметри елементів схеми заміщення котушки індуктивності за формулами:

$$Z_K = U/I_1, \quad X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}.$$

3.5 Перевірити виконання балансу потужностей у колі змінного струму $S_G = S$ на різних частотах. Для розрахунків скористатися формулами:

$S_G = U \cdot I$ – потужність джерела живлення;

$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ – повна потужність пасивних елементів схеми,

де $P = I^2 \cdot R_K$ – активна потужність; $Q = I_1^2 \cdot X_L - I_2^2 \cdot X_C$ – реактивна потужність; $X_C = U/I_2$ – опір ємності.

4 Зміст звіту

4.1 Назва й мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати оброблення експериментів у вигляді таблиць.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Сформулюйте теорему Теледжена.

5.2 У чому полягає принцип балансу потужностей в електричних колах?

5.3 Як визначити знак, з яким входить до рівнянь балансу потужностей

потужність незалежного джерела струму?

5.4 Як визначити знак, з яким входить до рівнянь балансу потужностей потужність незалежного джерела напруги?

5.5 Який вигляд мають рівняння балансу потужностей у колах змінного струму?

5.6 Якому фізичному явищу відповідає від'ємний знак потужності джерела?

5.7 Як визначити експериментально параметри елементів схеми заміщення реальної котушки індуктивності?

5.8 Визначіть поняття миттєвої, комплексної, активної, реактивної та повної потужностей. У яких одиницях їх вимірюють?

5.9 Наведіть умову передавання до навантаження максимальної потужності.

5.10 Чому дорівнює величина струму, яка б забезпечила передавання до навантаження максимальної потужності від джерела напруги з параметрами U_G та R_G ?

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 6

Тема. Дослідження пасивних елементів у колі синусоїдального струму

Мета: експериментальне дослідження амплітудних і частотних характеристик, а також розрахунок параметрів реальних пасивних елементів у разі гармонічної дії.

1 Короткі теоретичні відомості

У загальному вигляді комплексний опір можна подати у алгебраїчній формі запису:

$$\underline{Z} = R + j \cdot X = Z \cdot e^{j \cdot \varphi},$$

де $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ – модуль повного опору; $\varphi = \arctg X/R = \varphi_U - \varphi_I$ – різниця фаз між струмом та напругою.

Запишемо опір резистора:

$$\underline{Z}_R = R = R \cdot e^{j \cdot 0},$$

тобто $\varphi = \varphi_U - \varphi_I = 0$ – струм та напруга на резисторі збігаються за напрямом.

Реальна котушка індуктивності має втрати, які можна зобразити у вигляді резистора R_L , послідовно з'єднаного з котушкою (рис. 6.1, а).

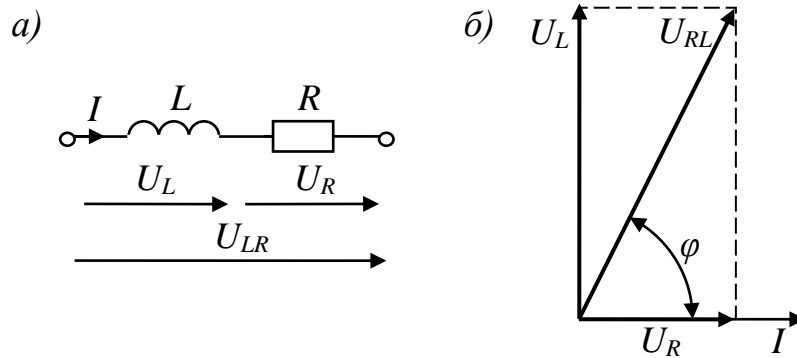


Рисунок 6.1 – Послідовна схема заміщення (а) та векторна діаграма розташування струму та напруг (б) реальної котушки індуктивності
Тоді її опір:

$$\underline{Z}_K = R + j\omega L = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} e^{j \cdot \arctg \frac{\omega L}{R}}.$$

З векторної діаграми (рис. 6.1, б) видно, що в ідеальній котушці напруга випереджає струм на $\varphi = 90$, а у реальній котушці за рахунок складової втрат U_{RL} цей кут менше $\varphi < 90$.

Конденсатор можна вважати ідеальним елементом з опором:

$$\underline{Z}_C = -j \frac{1}{\omega C} = -jX_C = X_C \cdot e^{-j \cdot 90},$$

тобто $\varphi = \varphi_U - \varphi_I = -90^\circ$ – напруга відстає від струму (за годинниковою стрілкою) на 90° .

Повна потужність S має складові:

$$\underline{S} = P + jQ = \sqrt{P^2 + Q^2} e^{j \cdot \varphi},$$

де $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ – активна складова повної потужності, Wm ; $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ – реактивна складова повної потужності, Var .

Потужність P розсіюється у вигляді тепла на резистивних елементах, а Q – відповідно на реактивних елементах кіл L та C .

2 Порядок виконання роботи

2.1 Скласти схему, зображену на рис. 6.2.

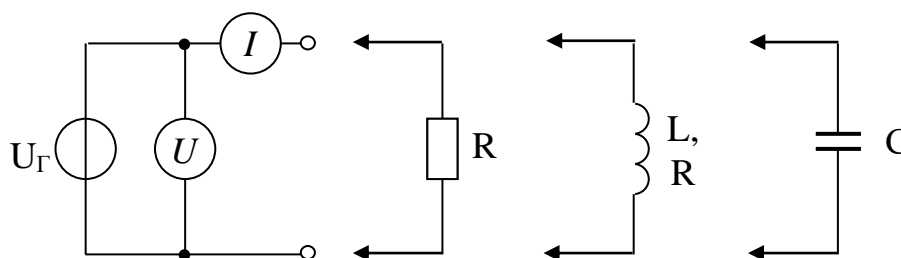


Рисунок 6.2 – Схема для дослідження ВАХ пасивних елементів

2.2 Зняти частотні характеристики елементів та записати до таблиці 6.1.

2.3 Омметром виміряти активний опір R_k котушки індуктивності.

3 Оброблення результатів

3.1 Розрахувати параметри елементів:

– резистор $R = U / I$;

– котушка $Z_L = U / I$, $X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_k^2}$, $L = X_L / \omega$;

– конденсатор $X_C = U / I$; $C = 1 / (X_C \cdot \omega)$.

Таблиця 6.1

Елементи	$f \times 10^3, \text{Гц}$							
		2	4	8	10	12	15	20
Резистор	$U, \text{В}$							
	$I, \text{мА}$							
Котушка	$U, \text{В}$							
	$I, \text{мА}$							
Конденсатор	$U, \text{В}$							
	$I, \text{мА}$							

3.2 Розрахувати різницю фаз між напругою та струмом: $\varphi = \arctg(X / R)$.

3.3 Розрахувати активну потужність: $P = U \cdot I \cos \varphi$.

3.4 Побудувати залежності опору від частоти для всіх елементів $Z = f(\omega)$.

Таблиця 6.2 – Обробка результатів експерименту

Елементи	$f \times 10^3, \text{Гц}$								Середні знач.			$P, \text{Вт}$
		2	4	8	10	12	15	20	$R, \text{Ом}$	$L, \text{Гн}$	$C, \text{Ф}$	
Резистор	$R, \text{Ом}$									—	—	
Котушка	$Z_L, \text{Ом}$											
	$X_L, \text{Ом}$											
	$L, \text{мГн}$										—	
	$\varphi, ^\circ$											
Конденсатор	$X_C, \text{Ом}$									—	—	
	$C, \text{мкФ}$											

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиці та графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Записати загальну потужність у показниковій та алгебраїчній формах запису.

5.2 Навести різновиди потужності на їхні одиниці виміру.

5.3 Навести різновиди пасивних елементів та розсіювану ними потужність.

5.4 Зобразити векторні діаграми струмів та напруг для котушки та ємності з втратами.

5.5 Пояснити фізичний сенс тангенсу кута втрат.

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 7

Тема. Послідовний коливальний контур. Резонанс напруг

Мета: вивчення властивостей послідовного коливального контуру.

1 Короткі теоретичні відомості

На наведеному стенді послідовний коливальний контур (рис. 7.1, а) складається з ємності C та котушки з втратами (елементи L та R).

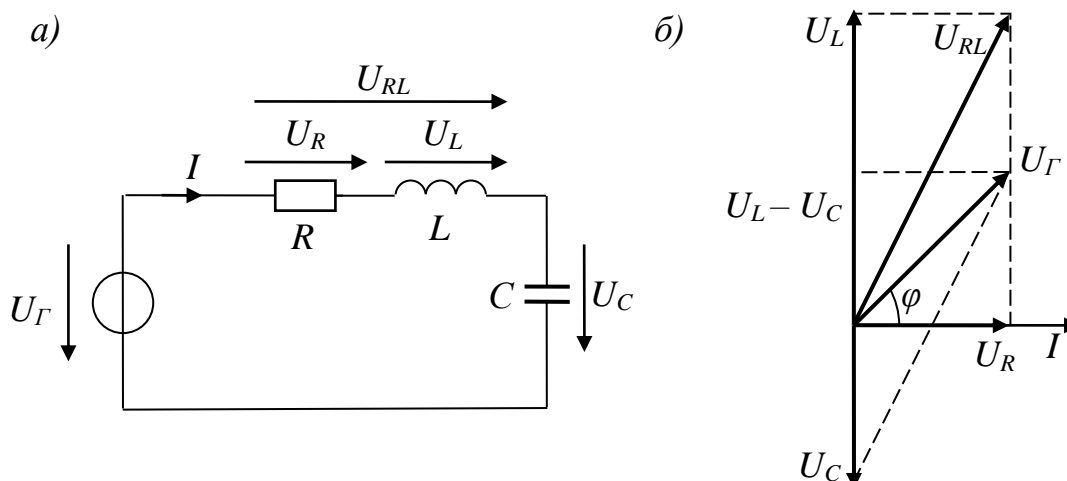


Рисунок 7.1 – Схема заміщення (а) та векторна діаграма розташування струму та напруг (б) послідовного коливального контура

У роботі є можливість виміряти тільки напруги U_{LR} , U_C , U_G , тому складові U_L та U_R необхідно розрахувати з відомих величин.

З векторної діаграми (рис. 7.1, б) маємо:

$$\begin{cases} U_G^2 = U_R^2 + (U_C - U_L)^2; \\ U_{RL}^2 = U_L^2 + U_R^2. \end{cases}$$

Розв'язок системи відносно U_L та U_R дає:

$$U_L = \frac{U_{RL}^2 + U_C^2 - U_G^2}{2 \cdot U_C}, \quad U_R = \sqrt{U_{RL}^2 - U_L^2} \quad (7.1)$$

У разі резонансу напруги на реактивних елементах стають однаковими $U_L = U_C$ і кут між струмом та загальною напругою $\varphi = 0$.

Загальний струм контура на резонансній частоті має максимальне значення (рис. 7.2) і визначається за формулою:

$$I(f) = \frac{U_{\Gamma}}{\sqrt{R^2 + \left(2\pi f \cdot L - \frac{1}{2\pi \cdot C}\right)^2}} \quad (7.2)$$

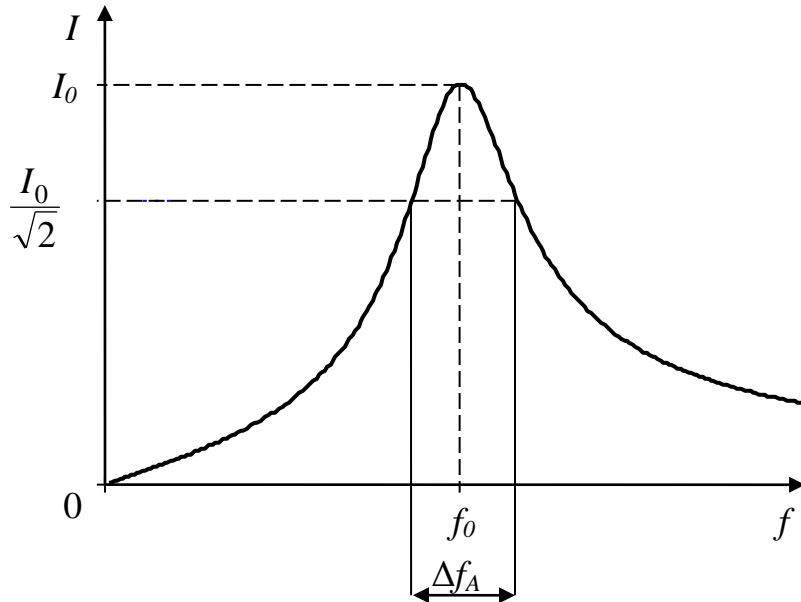


Рисунок 7.2 – Резонансна крива $I = f(f)$

Резонансною кривою можна скористатися для визначення добротності контура:

$$Q = f_0 / \Delta f_A,$$

де Δf_A – абсолютна полоса пропускання, межі якої визначаються за рівнем $1/\sqrt{2}$ відносно максимального значення I .

Величина добротності показує, у скільки разів напруга на реактивному елементі у разі резонансу (U_{L0} або U_{C0}) перевищує напругу генератора ($U_{\Gamma} = U_{R0}$):

$$Q = U_{L0} / U_{R0} = U_{C0} / U_{\Gamma}. \quad (7.3)$$

2 Порядок виконання роботи

2.1 Скласти схему, зображену на рис. 7.3.

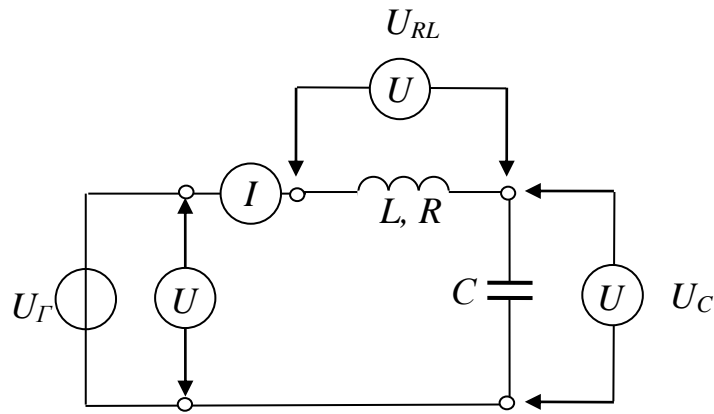


Рисунок 7.3 – Схема для дослідження характеристик послідовного коливального контуру

Таблиця 7.1

Виміряно	$f, \text{Гц}$	f_{min}$	...	...	f_{рез}$	...	...	f_{max}
	$I, \text{мА}$							
	$U_{RL}, \text{В}$							
	$U_C, \text{В}$							
Розраховано	$Z, \text{Ом}$							
	$U_R, \text{В}$							
	$U_L, \text{В}$							
	$L, \text{Гн}$							
	$R, \text{Ом}$							
	$C, \text{Ф}$							
	$\varphi, ^\circ$							

2.2 Знайти резонансну частоту контура за максимальним значенням загального струму, при цьому напругу генератора U_G необхідно підтримувати на одному рівні (наприклад, 1 В). Показання приладів занести до табл. 7.1.

Зробити аналогічні виміри для шести значень частот, котрі знаходяться симетрично, відносно резонансної частоти.

2.3. Омметром виміряти активний опір R котушки індуктивності.

3 Оброблення результатів

3.1 Розрахувати напруги U_L та U_R за формулою 7.1 та параметри

елементів: $L = \frac{U_L}{\omega \cdot I}$, $R = \frac{U_R}{I}$, $C = \frac{I}{\omega \cdot U_C}$.

3.2 Розрахувати різницю фаз між напругою та струмом:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\left(\frac{U_L - U_C}{U_R}\right).$$

3.3 Побудувати графіки залежності I , U_C , U_L , Z , φ від частоти f .

Графік $I = f(f)$ порівняти з теоретичною залежністю (7.2). Значення R , L та C взяти як середні значення з табл. 7.1.

3.4 Побудувати векторні діаграми за вимірюваними величинами (I , U_{RL} , U_C , U_L) для частот $f_{рез}$ та f_{max} .

3.5 Визначити добротність контура як відношення відповідних напруг у разі резонансу (7.3).

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиці та графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Як експериментально визначити резонансну частоту та добротність послідовного контура?

5.2 Як визначити абсолютне, відносне та узагальнене розладнання?

5.3 Чому дорівнює вхідний опір та загальний струм у разі резонансу?

5.4 Як експериментально визначити граничні частоти та смугу пропускання контура?

5.5 Пояснити фізичний сенс добротності у разі резонансу напруг.

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 8

Тема. Паралельний коливальний контур. Резонанс струмів

Мета: вивчення властивостей паралельного коливального контуру.

1 Короткі теоретичні відомості

На наведеному стенді коливальний контур (рис. 8.1, а) складається із паралельного з'єднання конденсатора та котушки з втратами (L та R_L). Струм I_{LR} можна розкласти на дві складові: активну I_R та I_L реактивну, які виділяються у разі паралельної схеми заміщення (рис. 8.1, б). Ці складові можна розрахувати через виміряні струми: I , I_{LR} та I_C .

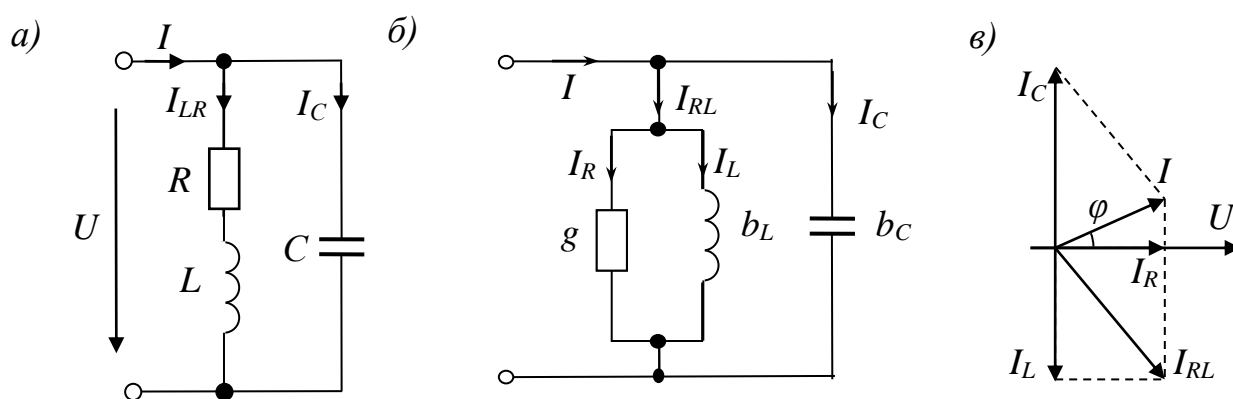


Рисунок 8.1 – Паралельний коливальний контур (а), його схема заміщення (б) та векторна діаграма (в)

Із векторної діаграми (рис. 3.1, в) маємо :

$$\begin{cases} I^2 = I_R^2 + (I_C - I_L)^2; \\ I_{RL}^2 = I_L^2 + I_R^2. \end{cases}$$

З системи рівнянь отримаємо значення струмів:

$$I_L = \frac{I_{RL}^2 + I_C^2 - I^2}{2 \cdot I_C}; \quad (8.1)$$

$$I_R = \sqrt{I_{RL}^2 - I_L^2}. \quad (8.2)$$

Якщо відома загальна напруга U , то можна визначити значення елементів схеми, зображеної на рис. 3.1, б:

$$g = \frac{I_R}{U}, \quad b_L = \frac{I_L}{U}, \quad b_C = \frac{I_C}{U}, \quad Y = \frac{I}{U}. \quad (8.3)$$

Отримаємо взаємозв'язок між провідністю гілок паралельної схеми заміщення (рис. 8.1, б) та елементами схеми (а):

$$\underline{Y} = \frac{1}{R_L + j\omega L} + j\omega C = \frac{R_L}{R_L^2 + (\omega L)^2} + j \left(\omega C + \frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2} \right) = g + j(b_C - b_L),$$

де $g = \frac{R_L}{R_L^2 + (\omega L)^2} = \frac{R_L}{Z_{LR}^2}$, $b_C = \omega C$, $b_L = \frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2} = \frac{\omega L}{Z_{RL}^2}$.

Звідки параметри елементів вихідної схеми:

$$R = Z_{RL}^2 \cdot g, \quad L = Z_{RL}^2 \cdot \frac{b_L}{\omega}, \quad C = \frac{b_C}{\omega}, \quad (8.4)$$

де $Z_{RL} = U / I_{RL}$.

У разі резонансу реактивні складові струмів стають однаковими $I_L = I_C$ і кут між загальним струмом та напругою $\varphi = 0$.

Якщо контур підключено до джерела струму, то спостерігається максимум загальної напруги (аналогічно рис. 2.2, але I треба замінити на U) і залежність $U = f(f)$ має вигляд:

$$U(f) = I \sqrt{\frac{R^2 + (2\pi f \cdot L)^2}{\left(1 - (2\pi f)^2 LC\right)^2 + (2\pi f \cdot CR)^2}}. \quad (8.5)$$

Добротність можна визначити графічно як за резонансною кривою, так і за відношенням відповідних струмів:

$$Q = I_{L0} / I_{R0} = I_{C0} / I = f_0 / \Delta f_A. \quad (8.6)$$

де Δf_A – абсолютна смуга пропускання, межі якої визначаються за рівнем $1/\sqrt{2}$ відносно максимального значення U .

2 Порядок виконання роботи

2.1. Скласти схему зображену на рис. 8.2.

2.2. Знайти резонансну частоту контура за максимальним значенням загальної напруги U , при цьому струм генератора I необхідно підтримувати на одному рівні (наприклад, 1 мА). Показання приладів занести до табл. 8.1.

Зробити аналогічні виміри для шести значень частот, котрі знаходяться симетрично, відносно резонансної частоти.

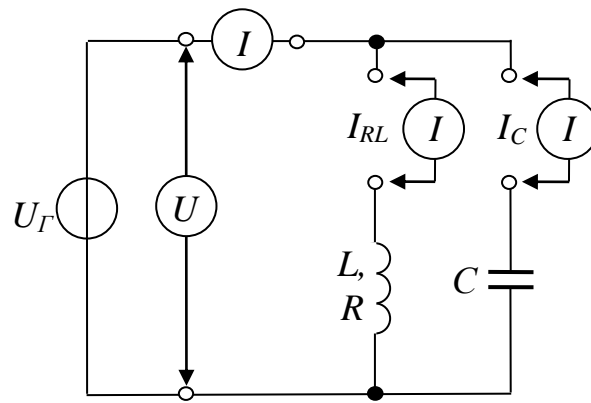


Рисунок 8.2 – Схема для дослідження характеристик паралельного коливального контуру

Таблиця 8.1

Виміряно	$f, \text{Гц}$	f_{min}$	...	...	f_{рез}$	...	...	f_{max}
	$I_{RL}, \text{мА}$							
	$I_C, \text{мА}$							
	$U, \text{В}$							
Розраховано	$I_L, \text{А}$							
	$I_R, \text{А}$							
	$Z_{RL}, \text{Ом}$							
	$Y, \text{См}$							
	$g, \text{См}$							
	$b_L, \text{См}$							
	$b_C, \text{См}$							
	$L, \text{Гн}$							
	$R, \text{Ом}$							
	$C, \text{Ф}$							
$\varphi, ^\circ$								

2.3. Омметром виміряти активний опір R_L котушки індуктивності.

3 Оброблення результатів

3.1 Розрахувати струми (формули 8.1 і 8.2) і параметри елементів (формули 3.3 і 3.4) паралельної схеми заміщення (рис. 8.1, б).

3.2 Фазовий зсув між напругою та струмом: $\varphi = \arctg \frac{I_C - I_L}{I_R}$.

3.3 Побудувати графіки залежності U , I_C , I_L , Y , φ від частоти f .

Графік $U = f(f)$ порівняти з теоретичною залежністю (8.5), у якій величини R , L та C взяти як середні значення з табл. 8.1.

3.4 Побудувати векторні діаграми за вимірними величинами (U , I_{RL} , I_C , I) для частот $f_{рез}$ та f_{max} .

3.5 Визначити добротність контура як відношення відповідних струмів у разі резонансу (8.6).

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиці та графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Як експериментально визначити резонансну частоту та добротність паралельного контура?

5.2 Як визначити добротність навантаженого контура?

5.3 Чому дорівнює вхідний опір ідеального паралельного контура у разі резонансу?

5.4 Який вигляд буде мати залежність вхідної напруги від частоти з незмінною величиною загального струму?

5.5 Пояснити фізичний сенс добротності у разі резонансу струмів.

Література: [1, 4, 5, 7].

Лабораторна робота № 9

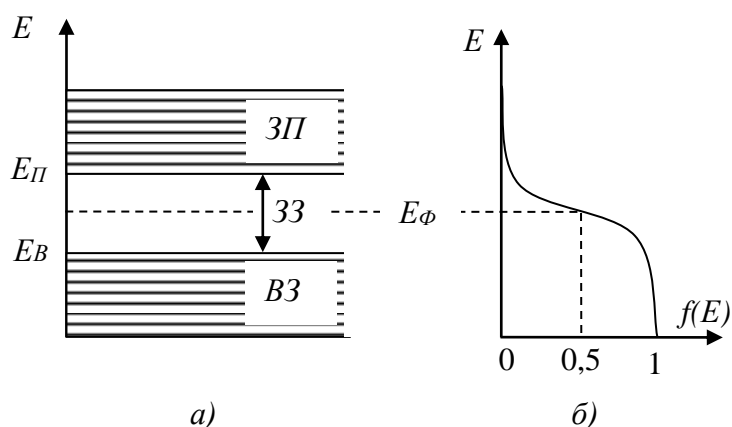
Тема. Визначення ширини забороненої зони напівпровідника

Мета: вивчення зонної теорії твердих тіл. Визначення ширини забороненої зони напівпровідникових матеріалів на підставі дослідних даних.

1 Короткі теоретичні відомості

Електрони в атомі можуть мати лише цілком певні дискретні значення енергії. Кожній орбіті відповідає певна енергія електрона, або дозволений енергетичний рівень. Рівні енергії, які не можуть мати електрони з переходом з однієї орбіти на іншу, називають забороненими. Відповідно до принципу Паулі, на одному енергетичному рівні не може бути більше двох електронів атома, причому власні механічні моменти (спини) цих двох електронів повинні бути антипаралельні, тобто обертатися навколо своєї осі в протилежних напрямках.

У твердому тілі, що складається з безлічі атомів, енергетичні рівні окремих атомів перекриваються, утворюючи енергетичні зони (рис. 9.1).



а – енергетичні зони твердого тіла: ВЗ – валентна; ЗЗ – заборонена; ЗП – провідності; *б* – розподілення Фермі (імовірність знаходження електрона на енергетичному рівні з енергією E)

Рисунок 9.1 – Енергетична діаграма напівпровідника

Електрони внутрішніх орбіт атома сильно зв'язані з ядром і в явищах провідності, а також у хімічних реакціях участі не беруть.

Сукупність енергетичних рівнів валентних електронів утворює валентну зону (ВЗ), вищий енергетичний рівень якої E_B називають стелею валентної зони. Сукупність вищих енергетичних рівнів вільних електронів утворить зону провідності (ЗП). Її характеризують енергією дна зони провідності E_{Π} . ВЗ і ЗП розділені забороненою зоною (ЗЗ), ширина якої $\Delta E_3 = E_{\Pi} - E_B$.

Провідність тієї або іншої речовини визначається тією енергією, яку потрібно надати валентним електронам, щоб вони могли перейти зі свого

валентного енергетичного рівня на вищий – у зоні провідності. При цьому електрони втрачають зв'язок з ядром атома і стають вільними.

У провідників зона провідності й зона валентних електронів перекривають одна одну, тобто заборонена зона відсутня, і валентні електрони легко переходять у зону провідності.

У діелектриків ширина забороненої зони велика і для переходу валентних електронів у зону провідності їм потрібно надати значну енергію.

Для напівпровідників заборонена зона відносно невелика (не перевищує 3 eV), і під дією зовнішніх чинників (тепло, світло, електричне поле й т.д.) електрони внаслідок зміни запасу енергії можуть перейти з нормальної зони в зону провідності. Електропровідність напівпровідників нестійка й сильно залежить від зовнішніх чинників.

За температури абсолютного нуля ($T = 0 \text{ K}$) і за відсутності інших джерел збудження електрони займають рівні з найменшою енергією. У напівпровідниках розподіл електронів за величинами енергії можна зобразити графіком (рис. 9.1, б), названим розподілом Фермі; по осі абсцис відкладене значення енергії, а по осі ординат – кількість електронів. Із графіка видно, що рівень Фермі (E_F) – це такий рівень, імовірність заповнення якого електронами за будь-яких температур дорівнює $1/2$.

З підвищенням температури у власному напівпровіднику з'являється імовірність того, що внаслідок взаємодії з тепловими коливаннями решітки електрони валентної зони отримають порції енергії, достатні для переходу на рівні вищої вільної зони провідності.

Поява внаслідок термічного збудження електронів частково заповненої енергетичної зони і є причиною виникнення електронної електропровідності.

Перехід електронів у зону провідності спричиняє звільнення такої самої кількості енергетичних рівнів у валентній зоні. Такі вакантні місця називають дірками, а зумовлену ними електропровідність речовин – дірковою електропровідністю.

Розглянемо домішкові напівпровідники.

Класичним прикладом *донорної* домішки є домішка миш'яку до германію. Миш'як (As) є елементом V групи періодичної системи і містить у зовнішній оболонці п'ять електронів. Нехай унаслідок уведення в германій цієї домішки та утворення твердого розчину заміщення в одному з вузлів кристалічної решітки розташувався атом миш'яку. При цьому чотири з п'яти валентних електронів миш'яку утворюють міцні ковалентні зв'язки з чотирма найближчими атомами германію. А п'ятий електрон миш'яку виявляється «зайвим», не належить до ковалентних зв'язків і взаємодіє з великою кількістю сусідніх вузлів кристалічної решітки та електронним газом кристала.

Домішкові атоми миш'яку вносять до енергетичної діаграми германію *локальний рівень* E_d , розташований у забороненій зоні безпосередньо біля дна зони провідності (рис. 9.2).

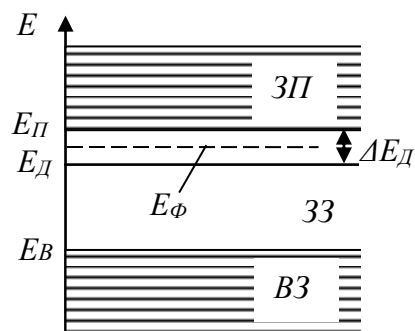


Рисунок 9.2 – Локальний рівень донорної домішки E_d в енергетичній діаграмі напівпровідника (E_{Π} – дно зони провідності, $E_{\text{В}}$ – стеля валентної зони)

За невеликої концентрації домішки, коли домішкові атоми не взаємодіють між собою, локальний рівень не розщеплений, вироджений і на ньому можуть розташовуватися стільки електронів, скільки домішкових атомів міститься в кристалі.

Очевидно, за температури абсолютного нуля такий локальний рівень повністю заповнений електронами. Однак уже за невеликого нагрівання кристала внаслідок малої енергії іонізації домішкових атомів виникають переходи електронів з цього рівня в зону провідності, забезпечуючи тим самим електронну електропровідність напівпровідника. Ця специфіка локальних рівнів, що розглядаються, і визначила їх назву – *донорні рівні*. Відповідно

домішки, що вносять до енергетичної діаграми напівпровідника або діелектрика донорні рівні, називають *донорними домішками* або *донорами*.

Суттєво, що внаслідок переходу електрона з донорного рівня в зону провідності утворений позитивний іон домішки не може переміщатися в кристалі під дією електричного поля, а тому не може бути ототожнений з діркою.

Отже, наявність у напівпровіднику донорної домішки спричиняє його домішкову електронну електропровідність (*n-електропровідність, тобто n-провідність*).

Класичним прикладом акцепторної домішки є атом індію в германії. Індій (In) є елементом III групи періодичної системи і містить у зовнішній оболонці три електрони. У разі заміщення атомом індію германію він трьома своїми валентними електронами утворить ковалентні зв'язки із сусідніми атомами германію. Четвертий зв'язок залишається незавершеним. Він може бути заповнений одним з електронів сусідніх ковалентних зв'язків між атомами германію. Однак для цього такий електрон повинен отримати невеликий додаток енергії ΔE_d (у нашому прикладі 0,011 eV).

З точки зору зонної теорії це означає, що домішка індію вносить до енергетичної діаграми германію локальний рівень, розташований у забороненій зоні безпосередньо над степою валентної зони (рис. 9.3). За невеликої концентрації домішки цей рівень нерозщеплений, вироджений і на ньому можуть розташовуватися стільки електронів, скільки домішкових атомів міститься в кристалі.

За температури абсолютного нуля локальний рівень вільний, а всі рівні валентної зони зайняті електронами. Однак через малу величину енергетичної щільності між локальним рівнем і валентною зоною вже за незначного нагрівання кристала відбуваються переходи електронів валентної зони на локальний рівень. Дірки, утворені унаслідок цього у валентній зоні, створюють *діркову електропровідність кристала*. Ця властивість локальних рівнів захоплювати електрони валентної зони визначила їх назву – *акцепторні рівні*, а домішки, які

вносять такі рівні до енергетичної діаграми, називають *акцепторними домішками* або *акцепторами*.

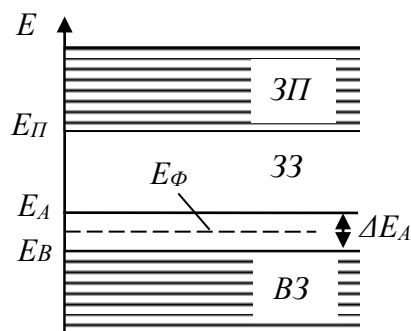


Рисунок 9.3 – Локальний рівень акцепторної домішки E_A в енергетичній діаграмі напівпровідника

Захоплюючи електрон валентної зони, атом акцепторної домішки перетворюється на негативний іон, який не може переміщатися в кристалі під дією електричного поля, оскільки міцно утримується у вузлі кристалічної решітки ковалентними зв'язками з іншими атомами.

Отже, наявність у напівпровіднику акцепторної домішки спричиняє його домішкову діркову електропровідність (*p-електропровідність* чи *p-провідність*).

Залежність питомої електропровідності σ та опору напівпровідника від температури виражається формулами:

$$\sigma = B \cdot \exp(-\Delta E/2kT), \quad R = A \cdot \exp(\Delta E/2kT), \quad (9.1)$$

де A , B – постійні для цього напівпровідника величини; k – стала Больцмана; T – абсолютна температура напівпровідника; ΔE – ширина забороненої зони.

Залежність (9.1) використовують в терморезисторах – напівпровідникових елементах електричних ланцюгів, величина опору яких змінюється зі зміною температури. Терморезистори, з'єднані послідовно з металічними резисторами, можуть компенсувати збільшення опору металів у разі нагрівання. Застосовуються вони також як пускові реостати електродвигунів, для охорони електричних ланцюгів від перенапруження.

Ширина забороненої зони напівпровідника ΔE для невеликого інтервалу температур майже постійна, і тому залежність (9.1) у напівлогарифмічних

координатах графічно виражається прямою лінією.

$$\ln R = \Delta E/2kT + \ln A$$

Для побудови графіка початок відліку вибирається довільно. Якщо графік побудований на підставі даних досліду, то за ним можна визначити ширину забороненої зони. Для двох точок графіка, що відповідають температурам T_1 і T_2 :

$$\ln R_1 = \Delta E/2kT_1 + \ln A, \quad \ln R_2 = \Delta E/2kT_2 + \ln A.$$

Із системи рівнянь:

$$\Delta E = 2k(\ln R_2 - \ln R_1)/(T_2^{-1} - T_1^{-1}). \quad (9.2)$$

Помилка визначення зменшуватиметься з віддаленням одна від одної вибраних точок.

2 Порядок виконання роботи

2.1 В установці для виконання роботи розміщені терморезистор (1) з нагрівальним елементом (3) і датчик температури (2). Нагрівальний елемент підключається до блока живлення (U_{Γ}). Схема підключення контрольно-вимірювальних приладів указана на рис. 9.4.

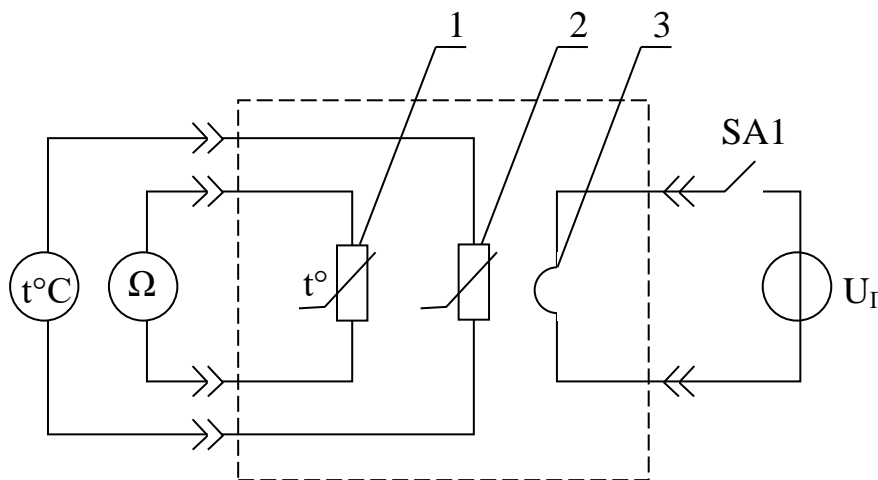


Рисунок 9.4 – Схема з'єднання лабораторної установки

2.2 Вивчити схему та виконати всі необхідні з'єднання. Установити необхідні межі вимірювань.

2.3 Зняти залежність опору терморезистора R від температури в діапазоні

від 20° до 70 °С.

Таблиця 9.1

t°, С	R, кОм	T, К	T ⁻¹ , 1/К	lnR	ΔE, еВ
20					
30					
40					
50					
60					
70					

3 Оброблення результатів

3.1 Для всіх значень виміряного опору розрахувати lnR, а також абсолютну температуру T та 1/T.

3.2 Побудувати графік залежності lnR від 1/T.

3.3 Обчислити за формулою (9.2) ширину забороненої зони напівпровідника в електрон-вольтах. Для розрахунків узяти $k = 8.62 \times 10^{-5}$ еВ/К.

3.4 Результати розрахунків занести до таблиці 9.1.

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиці та графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Запишіть і поясніть формулу енергії електрона в ізольованому атомі.

5.2 Чому розщеплюються в кристалах енергетичні рівні ізольованих атомів?

5.3 У чому полягає явище Зеємана? На скільки підрівнів розщеплюється енергетичний рівень ізольованого атома в кристалі?

5.4 Сформулюйте принцип Паулі для електронів твердого тіла.

5.5 Як визначають число енергетичних станів дозволеної зони твердого тіла?

5.6 Чи можуть електрони твердого тіла переходити з одних підрівнів дозволеної зони в інші?

5.7 Із чого складається електропровідність твердих тіл за зонною теорією?

5.8 За якими ознаками відбувається класифікація твердих тіл на провідники, напівпровідники і непровідники?

5.9 Надайте визначення провідників, напівпровідників і непровідників за зонною теорією твердих тіл.

5.10 Як залежить електропровідність напівпровідників від температури? Для пояснення відповіді використайте діаграму електричних зон.

Література: [1, 3, 6].

Лабораторна робота № 10

Тема. Дослідження характеристик напівпровідникових діодів

Мета: дослідження вольт-амперної характеристики напівпровідникових діодів і визначення контактної різниці потенціалів електроннодірчастого переходу

1 Короткі теоретичні відомості

Для дослідження характеристик і параметрів електронно-дірчастого переходу необхідно уявляти умови утворення двох типів напівпровідників, мати поняття про основні та неосновні носії зарядів, вивчити залежність концентрації носіїв від температури.

Електронно-дірчастий перехід являє собою область контакту двох напівпровідників з різними типами провідності.

У напівпровідниках n-типу внаслідок іонізації атомів донорної домішки утворюються носії заряду електронів, у напівпровідниках p-типу іонізація атомів акцепторної домішки призводить до появи дірок. Електрони в n-шарі та дірки у p-шарі мають назву «основні носії».

Наявність у місці контакту градієнта концентрації основних носіїв створює дифузійний потік електронів і дірок, спрямованих назустріч одне одному.

Унаслідок дифузії виникають некомпенсовані об'ємні заряди. Головне пам'ятати, як змінюється провідність напівпровідника в області, прилеглій до контакту. В утворенні провідності беруть участь тільки рухомі носії зарядів – електрони та дірки. Атоми кристалічної решітки, зокрема й атоми домішки, залишаються нерухомими, тобто не впливають на провідність. Перехід електронів із n-шару в р-шар, а дірок із р-шару в n-шар утворює в зоні контакту шар певної протяжності, збіднений носіями зарядів, тобто провідність цього шару зменшується.

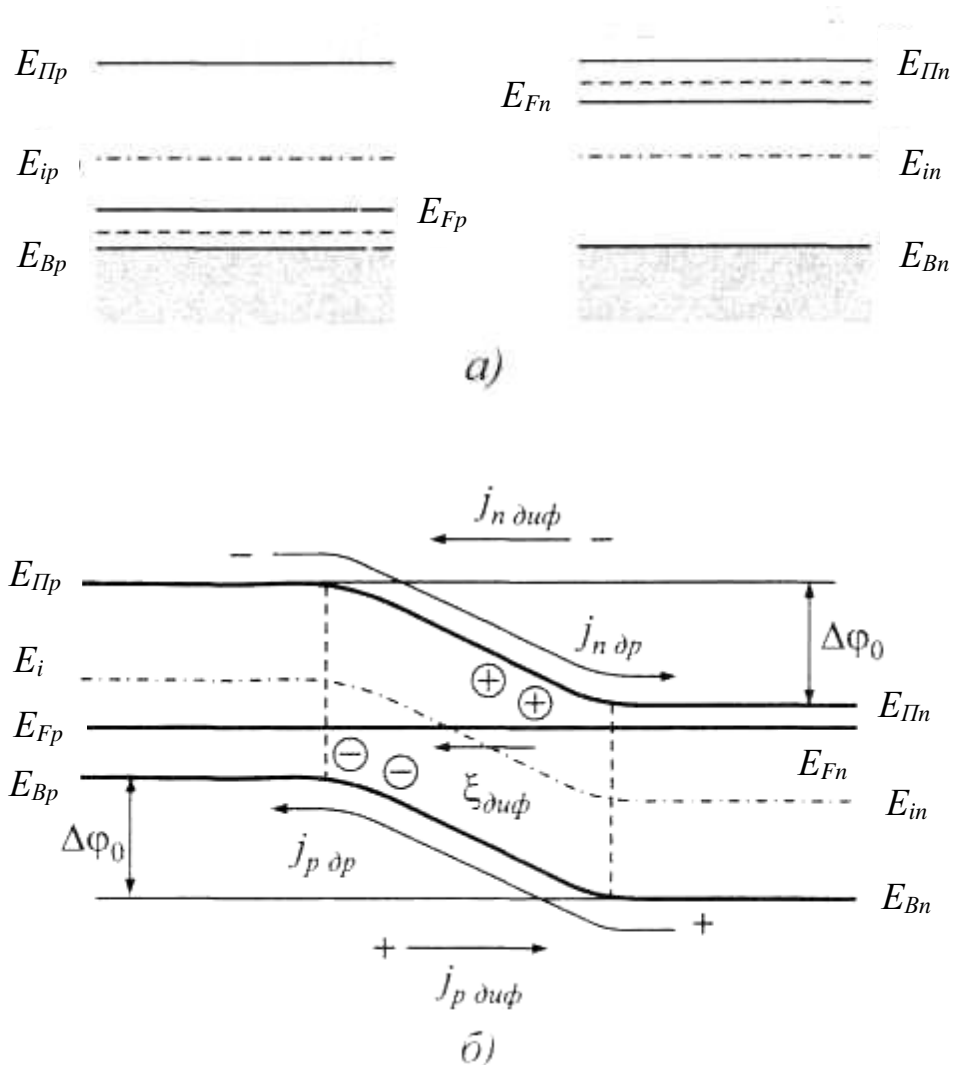


Рисунок 10.1 – Зонні діаграми напівпровідника р- і n-типу (а), утворення потенціального бар'єра (б)

Слід урахувати, що вказані некомпенсовані об'ємні заряди іонізованих атомів, донорів і акцепторів утворюють у шарі електронно-дірчастого переходу електричне поле, яке перешкоджає подальшій дифузії основних носіїв через перехід. Водночас це поле є прискорювальним для неосновних носіїв і спричиняє дрейфовий (по полю) струм електронів із р-шару в n-шар і зустрічний рух дірок.

Оскільки напрям дрейфового струму неосновних носіїв протилежний напрямку дифузійного струму основних носіїв, у стані рівноваги електронно-дірчастого переходу (за відсутності зовнішнього джерела напруги) устанавлюється таке контактне електричне поле, з яким ці струми рівні й компенсують один одного. Водночас у місці контакту виникає контактна різниця потенціалів U_k ($\Delta \varphi_0 = qU_k$)

Потрібно чітко уявляти процеси, що виникають в електронно-дірчастому переході за наявності зовнішньої напруги U . У цьому випадку рівновага між процесами дифузії та дрейфу порушується.

Унаслідок підімкнення до р-n переходу прямої напруги (плюс джерела до р-шару, мінус джерела до n-шару) виникає зниження потенціального бар'єра та збільшення струму основних носіїв через перехід у $\exp(eU/kT)$ разів, тобто призводить до різкого збільшення провідності переходу та росту дифузійного струму.

У разі зворотного зміщення висота потенціального бар'єра збільшується і різко зменшується дифузійний струм. Отже, зворотній струм через р-n перехід визначається дрейфовим струмом неосновних носіїв, для яких поле переходу є прискорювальним.

Вольт-амперна характеристика (ВАХ) електронно-дірчастого переходу визначається виразом:

$$I = I_H \times [\exp(eU/kT) + 1], \quad (10.1)$$

де I_H – струм насичення, відповідний дрейфовому струму неосновних носіїв зворотно зміщеного переходу; e – заряд електрона ($e = 1.6 \times 10^{-19}$), Кл; k – стала

Больцмана ($k = 1.38 \times 10^{-23}$), Дж/К; T – температура за шкалою Кельвіна; U – напруга, прикладена до переходу.

Вольт-амперні характеристики кремнієвого та германієвого діодів, що досліджуються у цій роботі, наведено на рис. 10.2.

Уже за невеликої зворотної напруги зворотний струм діода прямує до струму насичення, який можна записати у вигляді:

$$I_H = I_0 \times \exp(-eU_k/kT), \quad (10.2)$$

де I_0 – струм, який визначається концентрацією основних носіїв і мало залежить від температури в робочому діапазоні; U_k – контактна різниця потенціалів.

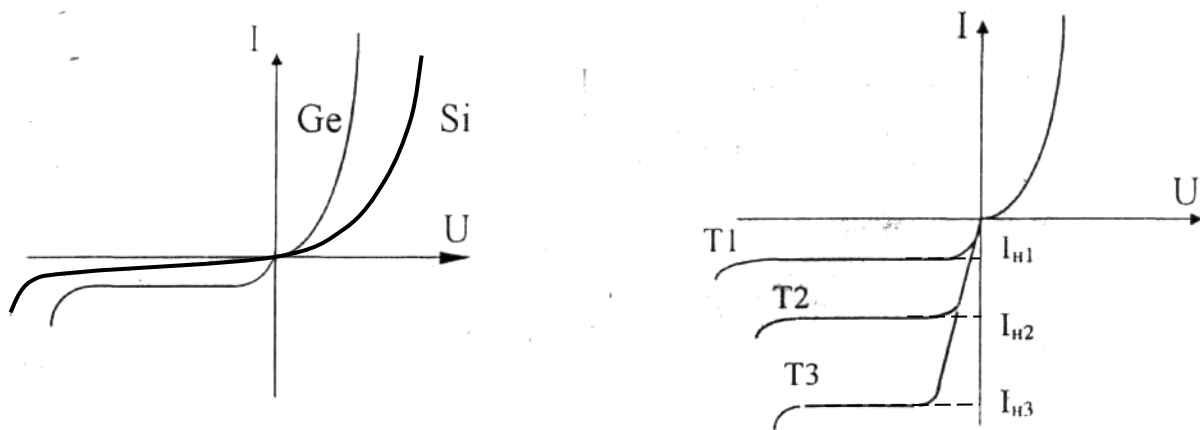


Рисунок 10.2 – Вольт-амперні характеристики діодів (а, б)

Зі збільшенням температури відбувається генерація пар носіїв зарядів – електронів і дірок, унаслідок чого струм через зворотно зміщений р-п перехід збільшується. На рис. 10.2, б наведено зворотні гілки вольт-амперної характеристики діода за різних значень температури.

Залежність (1) зручно записати у вигляді:

$$\ln(I/I_H + 1) = eU/(kT). \quad (10.3)$$

Перевага такої форми запису – лінійність залежності $\ln(I/I_H + 1)$ від зовнішньої напруги U . Зображення в таких координатах вольт-амперної характеристики дозволяє експериментально приймати її відповідність виразу (10.1). Після логарифмування (10.2) отримаємо:

$$\ln I_H = \ln I_0 - eU_k/(kT), \quad (10.4)$$

звідки видно, що залежність $\ln I_H = f(1/T)$, має лінійний характер (рис. 10.3). За нахилом цієї прямої можна визначити значення контактної різниці потенціалів:

$$U_k = k\Delta \ln I_H / e(1/T_1 - 1/T_2).$$

Струм насичення I_H визначають графічним продовженням зворотної гілки вольт-амперної характеристики до перетину з віссю ординат (рис. 10.2, б).

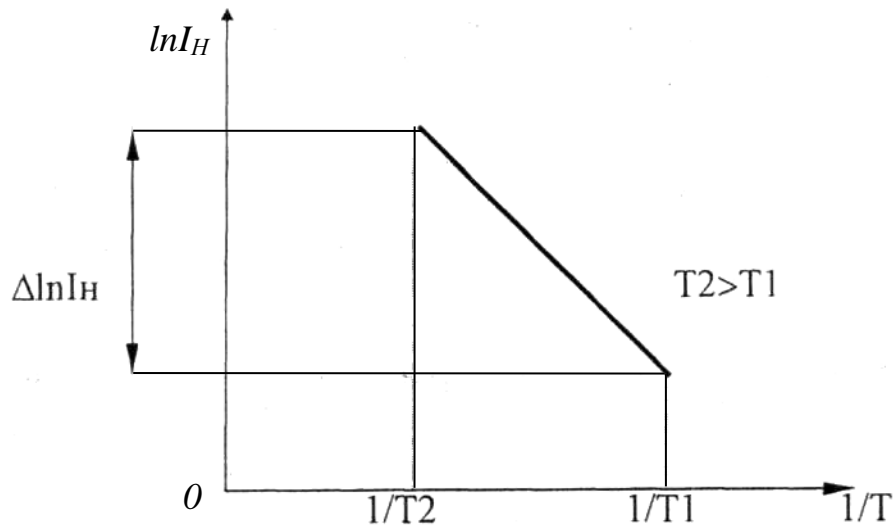


Рисунок 10.3 – Визначення контактної різниці потенціалів

2 Порядок виконання роботи

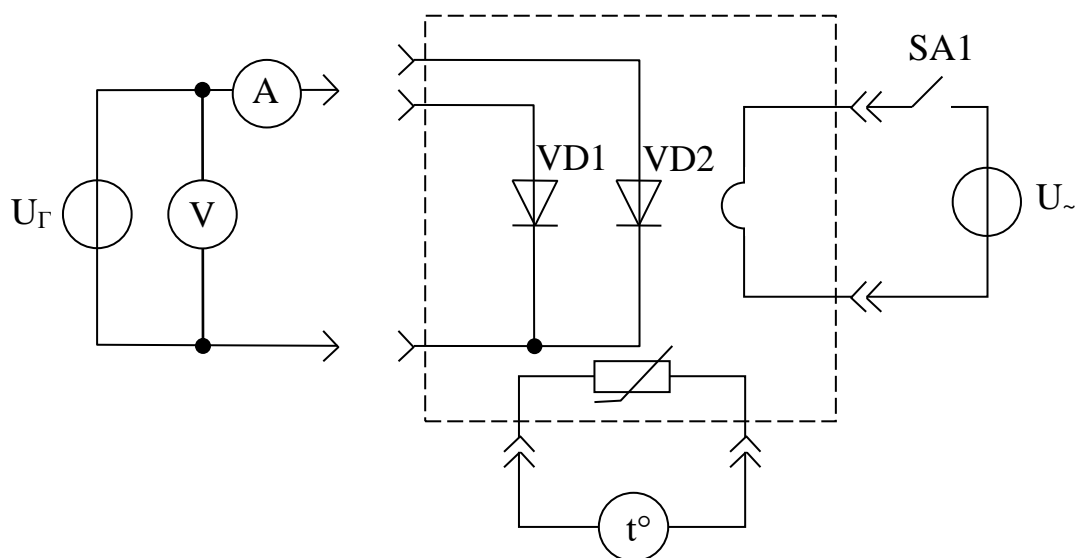


Рисунок 10.4 – Схема для дослідження вольт-амперних характеристик діодів

2.1. Зняти пряму гілку вольт-амперної характеристики германієвого, а потім кремнієвого діодів за кімнатної температури: $I_{np} = f(U_{np})$. Напругу змінювати з кроком 0,1 В до значення, за якого струм сягатиме величини 20 мА.

Таблиця 10.1 – Дані прямої гілки вольт-амперної характеристики діодів

Т _{кімн} , °С						
$U_{np}, В$	(Si)	0,1	0,2	0,3		...
$I_{np}, мА$						...
$U_{np}, В$	(Ge)	0,1	0,2	0,3		...
$I_{np}, мА$						...

2.2 Змінити полярність джерела та зняти зворотну гілку ВАХ діодів за кімнатної температури $I_{звор} = f(U_{звор})$. Напругу $U_{звор}$ установлюють від 0 до максимального значення 50 В з дискретністю 10 В. Отримані дані занести до таблиці 10.1.

На цьому стенді зняти ВАХ кремнієвого діода неможливо, тому що струм набуває достатніх для вимірювання значень лише після напруги – 100 В.

2.3 Увімкнути пристрій підігрівання діодів і зняти зворотні гілки вольт-амперної характеристики на температурах, заданих викладачем. Результати занести до табл. 10.2.

Таблиця 10.2 – Дані зворотної гілки вольт-амперної характеристики діода

Т, °С	$U_{звор}, В$	– 10	– 20	– 30	– 40	– 50
кімнатна	$I_{звор}, мкА$					
50						
60						
70						
80						

3 Оброблення результатів

3.1 За даними таблиць 10.1, 10.2 побудувати вольт-амперні

характеристики германієвого та кремнієвого діодів $I = f(U)$ на одному графіку, використовуючи різні масштаби на осях, як показано на рис. 10.5.

3.2 Визначити графічно струми насичення I_H для різних температур і занести до табл. 10.3.

Таблиця 10.3 – Дані зворотної гілки вольт-амперної характеристики діода

T, °C	T, °K	1/T	I_H , мкА	$\ln I_H$
кімнатна				
50				
60				
70				
80				

3.3 Розрахувати величини для таблиці 10.3 і побудувати графік залежності $\ln I_H = f(1/T)$.

3.4 Визначити контактну різницю потенціалів р-п переходу U_k , відповідно до рис. 10.2.

3.5 За даними таблиці 10.1 для германієвого діода, а також за значенням струму насичення за кімнатної температури за таблицею 10.3 побудувати графік залежності $\ln(I/I_H + 1) = f(U)$.

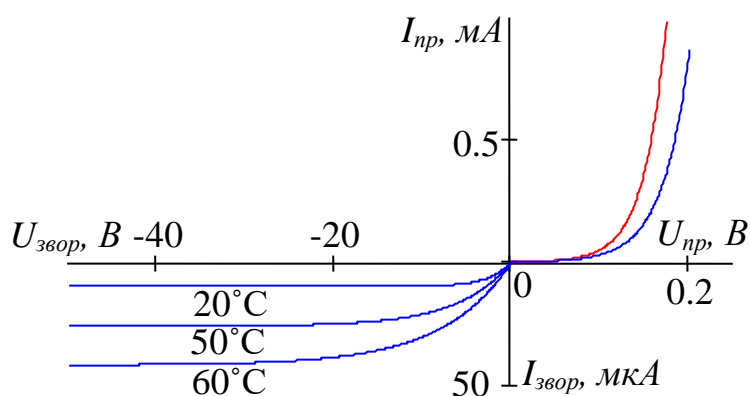


Рисунок 10.5 – Побудова експериментальних характеристик

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схеми лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиць і графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Нарисувати зонну структуру власного та домішкового напівпровідника.

5.2 Пояснити способи отримання напівпровідників р і n-типу.

5.3 Як визначають концентрацію основних і неосновних носіїв заряду напівпровідника?

5.4 Що таке дрейф носіїв заряду?

5.5 Що таке дифузія носіїв заряду?

5.6 Описати процес утворення р-n переходу.

5.7 Що таке контактна різниця потенціалів і від чого вона залежить?

5.8 Описати процеси за прямого зміщення р-n переходу.

5.9 Описати процеси за зворотного зміщення р-n переходу.

5.10 Пояснити залежність вольт-амперної характеристики р-n переходу від температури.

Література: [1, 3, 6].

Лабораторна робота № 11

Тема. Дослідження польового транзистора з керованим р-n переходом

Мета: дослідження вольт-амперних характеристик польового транзистора з керованим р-n переходом.

1 Короткі теоретичні відомості

Польовий транзистор – це напівпровідниковий прилад, підсилювальні властивості якого зумовлені потоком основних носіїв, що протікають через провідний канал і керовані електричним полем.

Польовий транзистор з керувальним переходом – це польовий транзистор, потоком основних носіїв у якому керують випрямним електричним переходом, зміщеним у зворотному напрямку.

Таким випрямним електричним переходом може бути p - n -перехід, гетеро-перехід або випрямний перехід Шотткі.

Польовий транзистор з керувальним p - n -переходом має два омичні переходи до зони напівпровідника, якою проходить керований або регульований потік основних носіїв заряду, та один або два керувальні p - n -переходи, зміщені у зворотному напрямку (рис. 3.1). Зі зміною зворотної напруги на керувальному p - n -переході змінюється його товщина, а отже, товщина ділянки, якою проходить керований потік основних носіїв заряду. Ділянку напівпровідника, у якій регулюється потік основних носіїв заряду, називають *провідним каналом*. Електрод польового транзистора, через який до провідного каналу надходять носії заряду, називають *витоком*. Електрод польового транзистора, через який з каналу виходять носії заряду, називають *стоком*. Електрод польового транзистора, на який подають сигнал, називають *заслоном*.

Провідний канал може мати електропровідність як n -, так і p -типу. Відповідно розрізняють польові транзистори з n -каналом і p -каналом. Усі полярності напруг зміщення, що подаються на електроди польових транзисторів з n - і p -каналом, протилежні. Польові транзистори з провідними каналами з різними типами електропровідності називають *комплементарними*, тобто доповнювальними один до одного за типом електропровідності провідних каналів. Комплементарні транзистори є зручними елементами для побудови деяких схем.

Керування струмом стоку, тобто струмом від зовнішнього відносно потужного джерела живлення у колі навантаження відбувається зі зміною зворотної напруги на p - n -переході заслону (або на двох p - n -переходах одночасно). Оскільки зворотні струми малі, потужність, необхідна для керування струмом стоку і використана від джерела сигналу в колі заслону, є надто малою. Тому польовий транзистор може забезпечити підсилення електричних сигналів як за потужністю, так і за струмом та напругою.

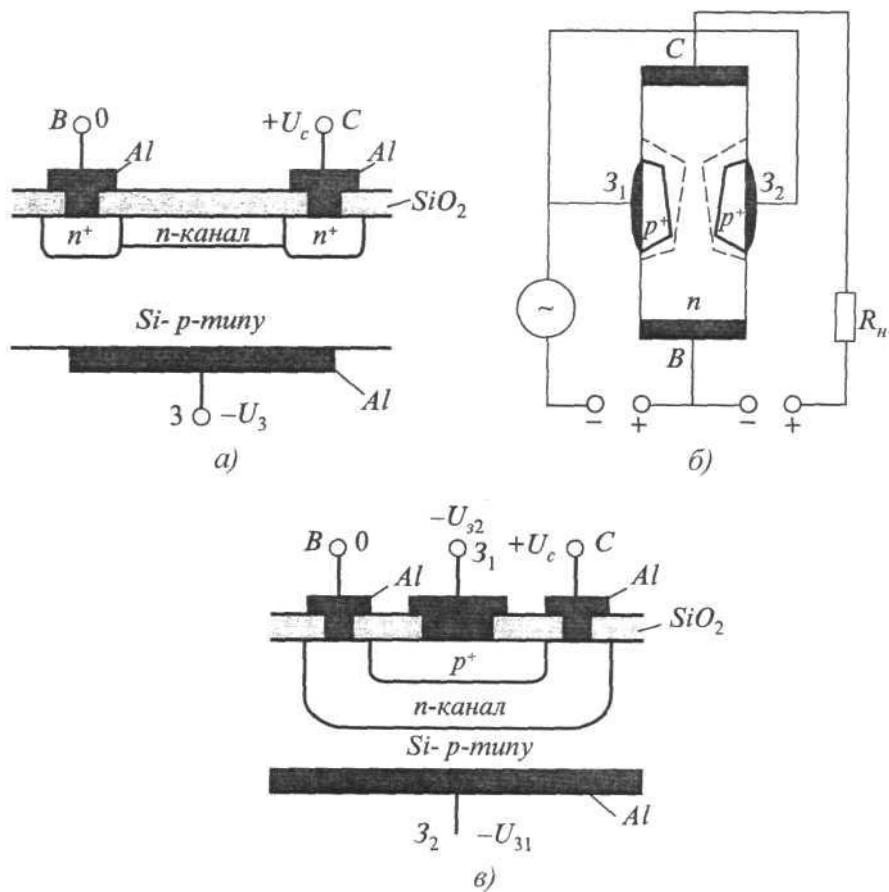


Рисунок 11.1 – Структури польових транзисторів з одним керувальним р-р-переходом (а), з двома керувальними р-р-переходами (б) і принципова схема вмикання зі спільним витоком (в)

Отже, польовий транзистор за принципом дії аналогічний до вакуумного тріода. Витік у польовому транзисторі подібний до катода вакуумного тріода, заслін – до сітки, стік – до анода. Водночас польовий транзистор суттєво відрізняється від вакуумного тріода. По-перше, для роботи польового транзистора не потрібне підігрівання катода. По-друге, будь-яку з функцій витоку і стоку може виконувати кожний з цих електродів. По-третє, польові транзистори можуть бути виготовлені як з n-, так і з p-каналом, що надає можливість успішно поєднувати ці два типи польових транзисторів у схемах.

Від біполярного транзистора і зокрема від одноперехідного транзистора польовий транзистор відрізняється, по-перше, принципом дії: у біполярному транзисторі керування вихідним сигналом здійснюється вхідним струмом, а в польовому транзисторі – вхідною напругою або електричним полем. По-друге,

польові транзистори мають більші входні опори, зумовлені зворотним зміщенням р-п переходу заслону в цьому типі польових транзисторів. По-третє, польові транзистори можуть мати низький рівень шуму (особливо на низьких частотах), оскільки в польових транзисторах не використовується явище інжекції неосновних носіїв заряду і канал польового транзистора відокремлений від поверхні напівпровідникового кристала (рис. 11.1, б, в). Процеси рекомбінації носіїв у р-п переході та в базі біполярного транзистора, а також генераційно-рекомбінаційні процеси на поверхні кристала напівпровідника супроводжуються виникненням низькочастотних шумів.

2 Порядок виконання роботи

2.1 Вивчити схему, зображену на рис. 11.2, та виконати всі необхідні з'єднання. Установити необхідні межі вимірювань.

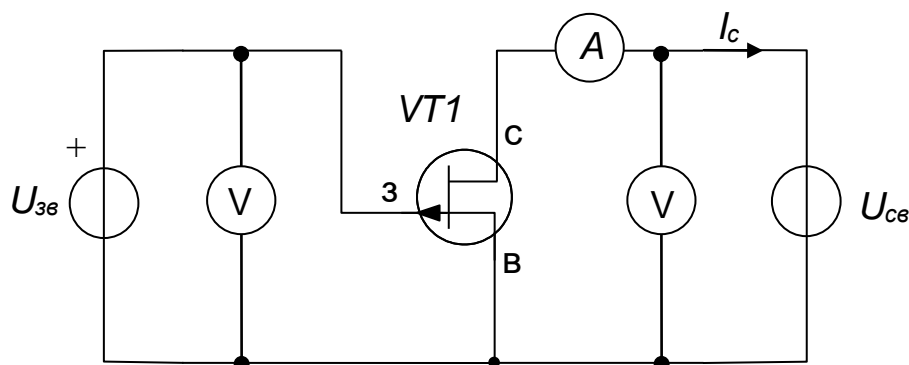


Рисунок 11.2 – Установка для зняття вольт-амперних характеристик польового транзистора

2.2 Зняти вихідні характеристики транзистора $I_C = f(U_{CB})$ за різних значень постійної напруги $U_{зв}$. Для цього за встановленого значення $U_{зв}$ змінювати напругу U_{CB} відповідно до таблиці 11.1 та знімати значення струму I_C (його максимальна величина не повинна перевищувати 20 мА).

Таблиця 11.1 – Експериментальні значення ВАХ транзистора

U_{CB}, B	U_{3B}, B				
	0	0,2	0,4	0,6	0,8
	I_C, mA				
0					
-4					
-8					
-12					

3 Оброблення результатів

3.1 Побудувати вихідні характеристики $I_C = f(U_{CB})|_{U_{3B}=\text{const}}$ за даними табл. 3.1.

3.2 За отриманими вихідними характеристиками побудувати прохідні стокзатворної характеристики $I_C = f(U_{3B})$ при $U_{CB} = 15 B$.

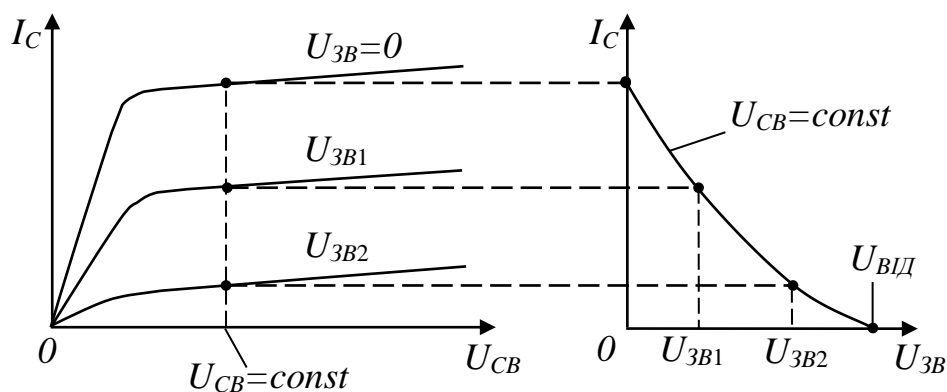


Рисунок 11.3 – Відповідність вихідних і прохідних ВАХ польового транзистора

3.3 Графічно визначити значення напруги відтинання U_{BID} як значення напруги на затворі U_{3B} , коли струм $I_C = 0$ (рис. 11.3).

3.4 Методом графічного диференціювання визначити максимальну крутизну стокзатворної характеристики:

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{3B}} \right|_{U_{CB}=\text{const}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}}.$$

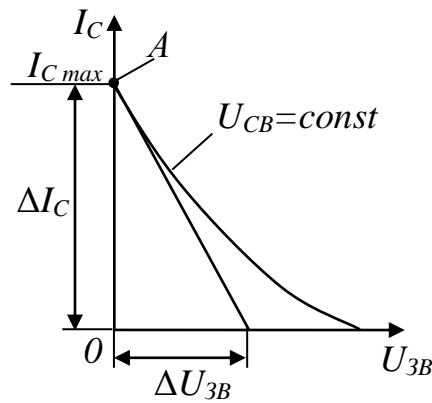


Рисунок 11.4 – Графічне визначення крутизни стоконатвірної характеристики

Характеристика має максимальну крутизну в точці перетину кривої з віссю I_C (точка А рис. 11.4). Для графічного визначення крутизни до точки А будується дотична, за допомогою якої можна визначити необхідні для розрахунку величини відповідно до рис. 11.4.

Порівняти отримане значення максимальної крутизни з аналітичним виразом:

$$S_{max} = \frac{2I_{Cmax}}{U_{ВД}}$$

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиць і графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Поясніть залежність глибини модуляції опору між стоком і витокон та посилювальними властивостями польового транзистора.

5.2 Що відбувається з глибиною модуляції опору каналу, якщо р-п-перехід зробити з двох протилежних боків?

5.3 Як впливає на струм стоку перекриття збідненим шаром каналу провідності?

5.4 За якої напруги на затворі відбувається відсічка струму стоку?

5.5 Поясніть механізм обмеження струму стоку.

Література: [1, 3, 6].

Лабораторна робота № 12

Тема. Дослідження польового транзистора з ізолюваним затвором

Мета: дослідження вольт-амперних характеристик польового транзистора з ізолюваним затвором

1 Короткі теоретичні відомості

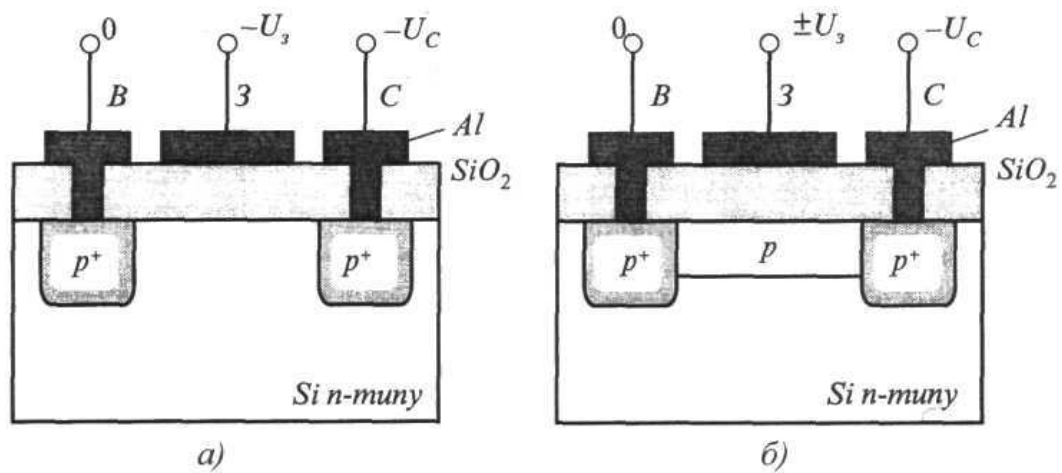
Принцип роботи транзистора зі структурою метал–діелектрик–напівпровідник (МДН) полягає в модуляції опору провідного каналу на поверхні напівпровідника під дією ефекту поля. Підсилювальний ефект цього транзистора ґрунтується на тому, що в його збідненій зоні відбувається зміна густини заряду, унаслідок чого змінюється опір каналу, що з'єднує стік і витік приладу. Керувальним чинником слугує зовнішній потенціал, прикладений до заслону.

Існують два різновиди МДН-транзисторів: з індукованим каналом і з вбудованим каналом (рис. 12.1).

У МДН-транзисторах з індукованим каналом (рис. 12.1, а) провідний канал між сильнолегованими ділянками витоку і стоку і, відповідно, помітний струм стоку з'являються тільки за певної полярності та за певного значення напруги на заслоні відносно витоку, яку називають пороговою напругою ($U_{зпор}$).

У МДН-транзисторах із вбудованим каналом (рис. 12.1, б) біля поверхні напівпровідника під заслоном за нульової напруги на затворі відносно стоку існує інверсний шар – канал, який з'єднує витік зі стоком.

Зображені на рис. 12.1 структури польових транзисторів з ізолюваним заслоном мають підшарок з електропровідністю n -типу. Тому сильнолеговані ділянки під витоком і стоком, а також індукований і вбудований канали мають електропровідність p -типу. Якщо ж аналогічні транзистори створені на підшарку електропровідністю p -типу, то канал у них буде мати електропровідність n -типу.



В – виток; З – заслон; С – стік

Рисунок 12.1 – Структура польових транзисторів з ізольованим заслоном (з р-каналом): а – з індукованим каналом; б – з убудованим каналом

МДН-транзистори з індукованим каналом. За нульової напруги на заслоні відносно витoku і за наявності напруги на стоці струм стоку буде безмежно малим. Це буде зворотний струм між підшарком і сильнолегованою зоною стоку. За від'ємного потенціалу на заслоні (для структури на рис. 12.1) унаслідок проникнення електричного поля через діелектричний шар до напівпровідника за малих напруг на заслоні (менших за порогову напругу) біля поверхні під заслоном виникають збіднений основними носіями заряду шар і ділянка об'ємного заряду, яка складається з іонізованих некомпенсованих домішкових атомів. За напруг на затворі, вищих від порогової, поблизу поверхні напівпровідника під заслоном виникає інверсний шар, який і є провідним каналом між витком і стоком. Зі зміною напруги на заслоні змінюється концентрація носіїв заряду в провідному каналі, а також товщина або поперечний переріз провідного каналу, тобто відбувається модуляція опору провідного каналу. Основною причиною модуляції опору провідного каналу в МДН-транзисторах з індукованим каналом є зміна концентрації носіїв заряду в провідному каналі; у польових транзисторах з керувальним переходом – зміна товщини або поперечного перерізу каналу.

Розглянемо МДН-транзистор з індукованим каналом n-типу, що працює в режимі збагачення. У вихідному стані в підзаслінному діелектрику звичайно наявний рівноважний заряд, що спричиняє вигин зон (рис. 12.2, а). Тому порогову напругу можна розділити на дві складові:

$$U_0 = U_{0F} + U_{0v}.$$

Величина U_{0F} – напруга випрямлення зон, тобто напруга, яку потрібно прикласти до заслону для ліквідації вихідного викривлення зон:

$$U_{0F} = \varphi_0 + Q_{0s}/C_0.$$

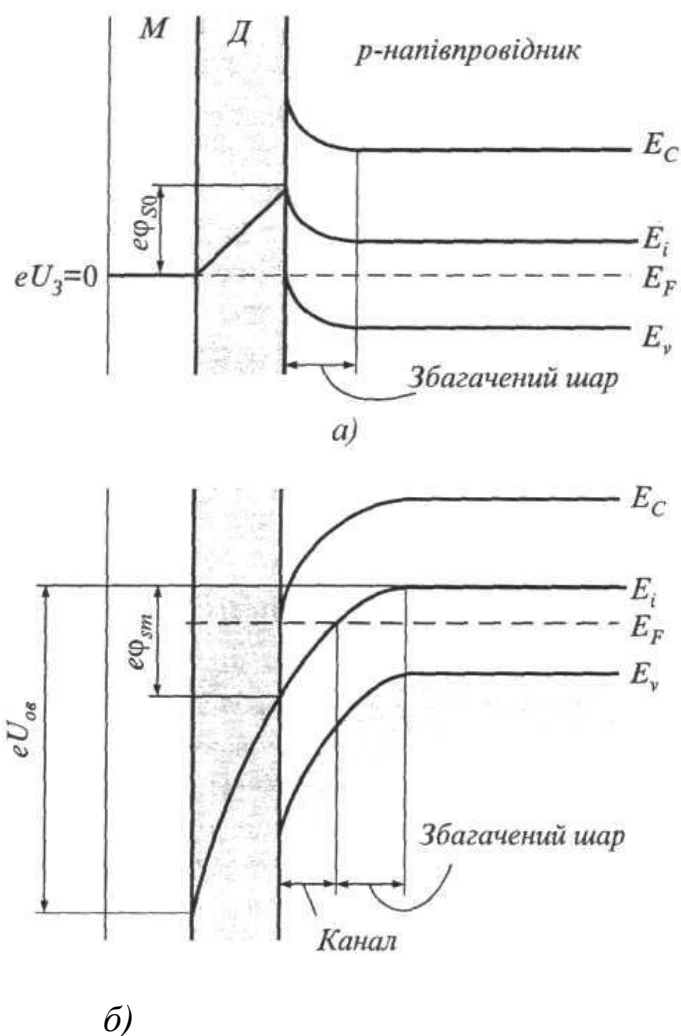


Рисунок 12.2 – Енергетичні діаграми МДН-транзистора: а – вихідний стан; б – стан після подачі напруги згину зон U_{0v}

Тут φ_0 – контактна різниця потенціалів між металом заслону та діелектриком; Q_{0s} – рівноважний питомий заряд поверхні. На рис. 12.2 показано вихідне викривлення зон, протилежне до того, за якого утворюється канал.

Величина U_{0v} – напруга вигину зон, тобто напруга, яку необхідно прикласти до заслону для вигину зон у бік, необхідний для утворення провідного каналу (рис. 12.2, б).

Оскільки положення рівня Фермі не змінюється, то з вигином зон униз він наближається до дна зони провідності, що відповідає збільшенню концентрації електронів у поверхні напівпровідника. За достатньої зовнішньої напруги рівень Фермі може виявитися вищим за середину забороненої зони, а це означає, що у поверхні концентрація електронів перевищує концентрацію дірок, тобто знак провідності в приповерхневому шарі змінюється на протилежний і утворюється канал n-типу. Такий стан називають інверсією поверхневої провідності.

Співвідношення між напругами та струмами в МДН-транзисторах визначають за допомогою вихідних і передавальних характеристик (рис. 12.3, а, б).

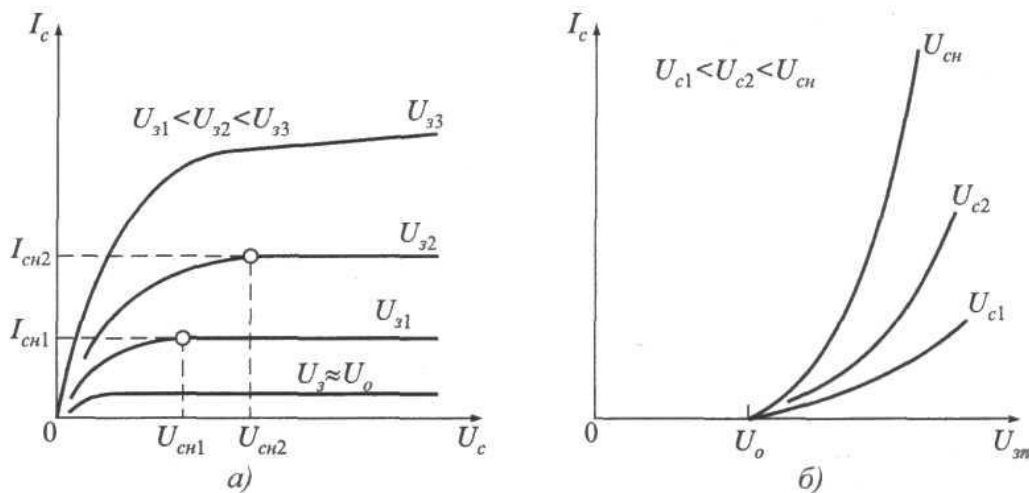


Рисунок 12.3 – Статичні характеристики МДН-транзистора: а – вхідні; б – передавальні

Якщо напруга $U_{св}$ не дуже велика, то канал поводить себе як звичайний опір, а струм збільшуватиметься пропорційно до напруги стоку. Цю зону на вихідних вольт-амперних характеристиках називають *лінійною ділянкою роботи транзистора*.

Після досягнення напругою стоку значення напруги насичення U_{CH} умови відповідають початку режиму відсікання каналу.

Після відсікання каналу струм стоку майже перестає залежати від потенціалу стоку. Цю зону на вихідних вольт-амперних характеристиках називають зоною насичення струму стоку.

МДН-транзистори із вбудованим каналом. Модуляція опору провідного каналу МДН-транзистора може відбуватися за зміни напруги на заслоні як додатної, так і від'ємної полярності. Отже, МДН-транзистор із вбудованим каналом може працювати в двох режимах: у режимі збагачення та в режимі збіднення каналу носіями заряду. Ця особливість МДН-транзисторів із вбудованим каналом відбивається і на зміщенні вихідних статичних характеристик зі зміною напруги на заслоні та його полярності (рис. 12.4, а).

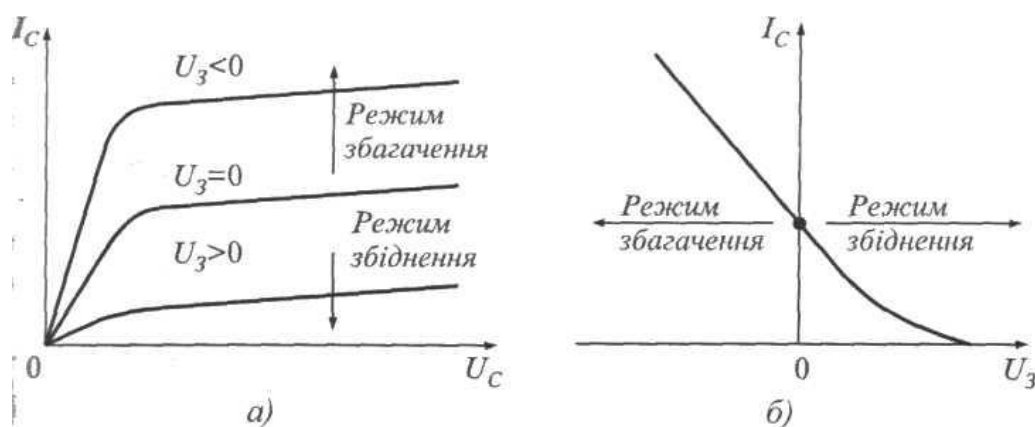
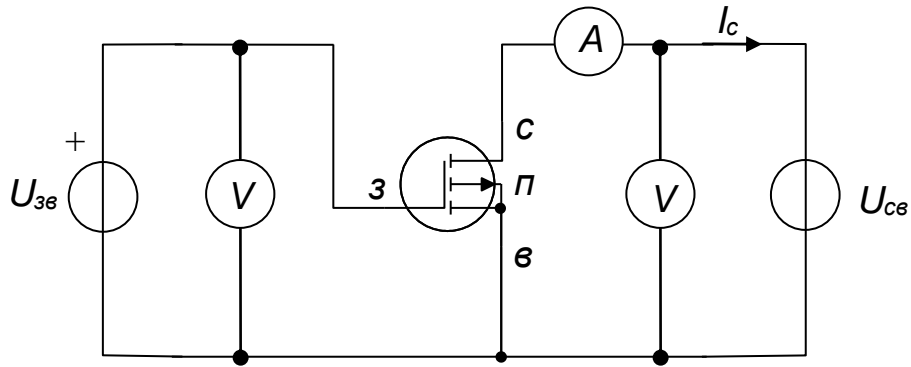


Рисунок 12.4 – Вихідні статичні характеристики (а) і статичні характеристики передачі (б) МДН-транзистора з вбудованим р-каналом

Статичні характеристики передачі (рис. 12.4, б) виходять з точки на осі абсцис, яка відповідає напрузі відсікання $U_{звідс}$ тобто напрузі між заслоном і витокком МДН-транзистора з вбудованим каналом, який працює в режимі збіднення, коли струм стоку досягає заданого низького значення.

2 Порядок виконання роботи

2.1 Вивчити схему, зображену на рис. 12.5, і виконати всі необхідні з'єднання. Установити необхідні межі вимірювань.



з – затвор; с – стік; в – витік; п – підложка

Рисунок 12.5 – Схема для дослідження ВАХ польового транзистора

2.2 Зняти вихідні характеристики транзистора $I_C = f(U_{CB})$ за різних значень постійної напруги U_{3B} . Для цього за встановленого значення U_{3B} змінювати напругу U_{CB} відповідно до таблиці 12.1 і знімати значення струму I_C (його максимальна величина не повинна перевищувати 20 мА).

Таблиця 12.1 – Експериментальні значення ВАХ транзистора

U_{CB}, B	U_{3B}, B				
	-1	0	1	2	3
	I_C, mA				
0					
4					
8					
12					

2.3 Змінити полярність джерела U_{3B} на протилежну та аналогічно п. 2.2 зняти декілька гілок характеристики $I_C = f(U_{CB})$.

Для транзистора з індукованим каналом переконатися, що струм відсутній.

3 Оброблення результатів

3.1 Побудувати вихідні характеристики $I_C = f(U_{CB})|_{U_{3B}=\text{const}}$ за даними табл. 12.1.

3.2 За отриманими вихідними характеристиками побудувати декілька прохідних стоконатворних характеристик $I_C = f(U_{3B})$ при $U_{CB} = const$. Методику побудови кривих подано в попередній лабораторній роботі (п. 4.2).

3.3 Відповідно до типу транзистора графічно визначити значення напруги відсікання $U_{звідс}$, або межевої напруги відкриття каналу $U_{змеж}$.

3.4 Методом графічного диференціювання для довільної точки визначити крутизну стоко-затворної характеристики (пояснення – у попередній л. р., п. 3.4):

$$S = \left. \frac{dI_C}{dU_{3B}} \right|_{U_{CB} = \text{const}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{3B}},$$

а також величину динамічного опору каналу за вихідними характеристиками в зоні насичення (рис. 12.6):

$$R = \left. \frac{dU_{CB}}{dI_C} \right|_{U_{3B} = \text{const}} = \frac{\Delta U_{CB}}{\Delta I_C}.$$

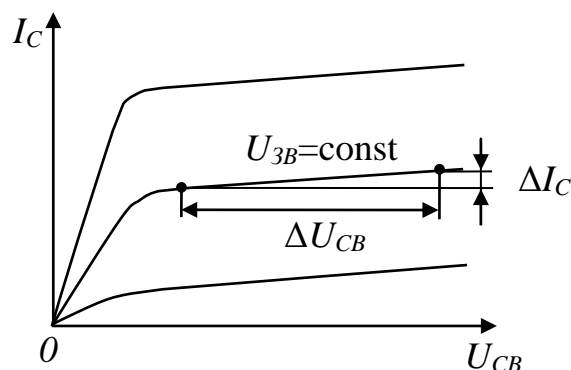


Рисунок 12.6 – До визначення динамічного опору каналу

4 Зміст звіту

- 4.1 Назва і мета роботи.
- 4.2 Схема лабораторної установки.
- 4.3 Таблиця результатів вимірювань.
- 4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиць і графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

- 5.1. Яке явище має назву «ефект поля»?

5.2. Поясніть механізм виникнення інверсії в МДН структурі відповідно до положення зонної теорії.

5.3. У якому режимі працює МДН структура з індукованим каналом?

5.4. Що характеризує дебаївська довжина екранування?

5.5. Наведіть умовно графічні зображення транзисторів з індукованим і вбудованим каналами з різними типами провідності.

Література: [1, 3, 6].

Лабораторна робота № 13

Тема. Дослідження характеристик світловипромінювальних діодів

Мета: вивчення явища генерації світла в напівпровідниках і характеристик світлодіодів.

1 Короткі теоретичні відомості

Світловипромінювальним діодом називається напівпровідниковий діод, призначений для перетворення електричної енергії на енергію некогерентного світлового випромінювання. Під час протікання через діод прямого струму відбувається інжекція неосновних носіїв заряду в базову ділянку діодної структури. Процес самодовільної рекомбінації інжектованих неосновних носіїв заряду, що відбувається як у базовій області, так і в самому р-п переході, супроводжується їх переходом з високого енергетичного рівня на більш низький; водночас надлишкова енергія виділяється унаслідок випромінювання кванта світла. Довжина хвилі випромінювання λ пов'язана із зміною енергії електрона ΔE співвідношенням: $\lambda = hc/\Delta E$, де h – постійна Планка; c – швидкість світла.

Діапазон довжин хвиль видимого оком світла складає 0,45...0,68 мкм, а ΔE майже дорівнює ширині забороненої зони $\Delta E_{зз}$ напівпровідника, на підставі якого виготовлений світловипромінювальний діод. Щоб фотони, які утворилися під час рекомбінації, відповідали квантам видимого світла, ширина забороненої зони напівпровідника повинна бути достатньо великою ($\Delta E_{зз} > 1$ eВ). З огляду

на це обмеження для виготовлення світловипромінювальних діодів використовуються такі напівпровідникові матеріали: фосфід галію (GaP), карбід кремнію (SiC), тверді розчини (GaAsP, AlGaAs), а також нітрид галію (GaN), який має найбільшу ширину забороненої зони ($\Delta E_{зз} = 3, \text{ eV}$), що дозволяє одержувати випромінювання в короткохвильовій частині видимого спектра аж до фіолетового. Додаванням до напівпровідникового матеріалу активаторів можна змінювати в деяких межах колір випромінювання діода.

Робота деяких світловипромінювальних приладів основана на подвійному перетворенні енергії: електричної енергії на інфрачервоне випромінювання з подальшим перетворенням його на видиме світло. Такі прилади виготовляють на основі арсеніду галію, найефективнішого матеріалу, що має максимум випромінювання в інфрачервоній області ($\lambda_{\text{max}} = 0,9 \text{ мкм}$). Перетворення на видиме випромінювання відбувається за рахунок збудження антистоксового люмінофора, що покриває випромінювальну поверхню діода. Перевагою цього приладу є висока стабільність кольору у разі зміни прямого струму, недоліком – низький КПД перетворення і знижений термін служби та зберігання, пов'язаний зі старінням люмінофора. За конструктивною ознакою світлодіоди випускають в металевих корпусах зі скляною лінзою (мають високу спрямованість випромінювання), у пластмасових корпусах з оптично прозорого, частіше кольорового компаунда, що створює розсіяне випромінювання; і безкорпусні.

Світловипромінювальні діоди в основному застосовуються як елементи індикації ввімкнення, готовності апаратури до роботи, наявності напруги живлення в блоці, аварійної ситуації та інших станів. Дискретні світлодіоди в пластмасових корпусах застосовуються так само для набору матриць і лінійних шкал, що слугують засобами відображення великорозмірної цифрової інформації.

Основними параметрами промислових світловипромінювальних діодів є:

1. Сила світла I_v – випромінюваний діодом світловий потік на одиницю тілесного кута у напрямку, перпендикулярному до площини

випромінювального кристала. Указується із заданим значенням прямого струму і вимірюється в канделах.

2. Яскравість V – величина, яка дорівнює відношенню сили світла до площі поверхні, що світиться. Вимірюється в канделах на квадратний метр із заданим значенням прямого струму через діод.

3. Постійна пряма напруга $U_{\text{пр}}$ – значення напруги на світлодіоді під час протікання прямого струму.

4. Максимально допустимий постійний прямий струм $I_{\text{пр. max}}$ – максимальне значення постійного прямого струму, за якого забезпечується задана надійність під час тривалої роботи діода.

5. Максимальна допустима зворотна постійна напруга $U_{\text{зв. max}}$ – максимальне значення постійної напруги, прикладеної до діода, за якого забезпечується задана надійність під час тривалої роботи.

6. Максимальна допустима зворотна імпульсна напруга $U_{\text{зв. i. max}}$ – максимальне пікове значення зворотної напруги на світлодіоді, зокрема як однократні викиди, так і періодичні, що повторюються.

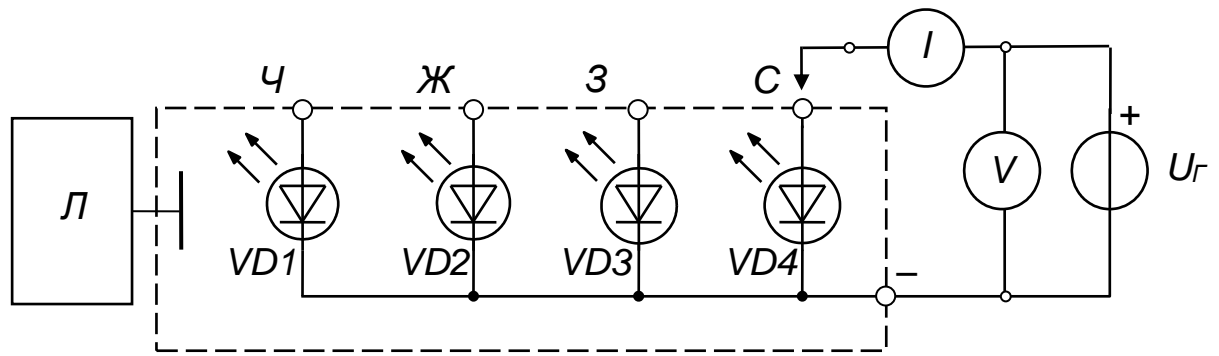
7. Максимум спектрального розподілу λ_{max} – довжина хвилі випромінювання, що відповідає максимуму спектральної характеристики випромінювання.

Характеристикою діода як джерела світла є залежність яскравості від прямого струму, тобто $V = f(I_{\text{пр}})$ – характеристика яскравості, або залежність сили світла від прямого струму, $I = f(I_{\text{пр}})$ – світлова характеристика.

Випромінювання діода так само характеризується діаграмою спрямованості, яка визначається конструкцією діода, наявністю лінзи, оптичними властивостями матеріалу, який захищає кристал.

2 Порядок виконання роботи

2.1 Скласти лабораторний стенд за схемою, зображеною на рис. 13.1.



Л – люксметр; Ч – червоний, Ж – жовтий, З – зелений та С – синій кольори світіння світлодіодів

Рисунок 13.1 – Схема вимірювальної установки

2.2 Провести вимірювання залежності освітленості E майданчика люксметра від струму I через світлодіод червоного кольору світіння. Результати вимірювань занести до таблиці 13.1.

Для світлодіодів червоного та жовтого кольорів світіння струм не повинен перевищувати $I_2 = 20$ мА, а напруга – $U_2 = 2,2$ В.

Таблиця 13.1

I , мА	1	3	5	10	15
U , В					
E , лк					
Φ , лм					
I_v , кд					

2.3 Повторити вимірювання для світлодіодів інших кольорів світіння.

Значення струму I для світлодіода жовтого кольору світіння встановлювати аналогічно червоному, відповідно до значень з табл. 13.1.

Значення струму I для світлодіодів зеленого та синього кольорів світіння встановити такими: 1, 2, 3, 4, 5 мА.

Для світлодіодів зеленого та синього кольорів світіння струм не повинен перевищувати $I_2 = 5$ мА, а напруга – $U_2 = 3$ В.

3 Оброблення результатів

3.1 Розрахувати величину світлового потоку (у люменах) $\Phi = E \cdot S$, де S – площа приймального майданчика люксметра, діаметр якого $d = 35$ мм.

3.2 Розрахувати значення сили світла (у канделах) світлодіода за формулою: $I_v = \Phi/\pi$, де π – величина тілесного кута. Розраховані значення занести до таблиці 13.1.

3.3 Побудувати графіки залежностей: ВАХ прямих гілок світлодіодів $U = f(I)$, люксамперну $E = f(I)$, освітленості від прямого струму $\Phi = f(I)$, світлову характеристику $I_v = f(I)$ для світлодіодів різних кольорів.

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати оброблення експериментів у вигляді таблиці та графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Електролюмінесценція в р-п переходах. Внутрішній квантовий вихід.

5.2 Навести залежність світлового потоку, що генерується світлодіодом від прикладеної напруги і температури.

5.3 Спектральні характеристики і швидкодія світлодіодів.

5.4 Втрати на поглинання і віддзеркалення.

5.5 Матеріали і конструкції світловипромінювальних діодів.

Література: [1, 3, 6].

Лабораторна робота № 14

Тема. Дослідження характеристик резисторної оптопари

Мета: вивчення будови оптронів та характеристик резисторних оптопар.

1 Короткі теоретичні відомості

Оптрон – це прилад, що містить джерело і приймач випромінювання, які оптично і конструктивно пов'язані один з одним. Джерелами світла можуть слугувати лампи розжарювання, неонові лампи, проте, у більшості випадків

ними є світлодіоди. Як приймачі випромінювання використовують фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори і фототиристри. Середовищем оптичного каналу, що зв'язує випромінювач і приймач, можуть бути повітря, скло, пластмаса й інші прозорі речовини.

Елементарний оптрон, який містить одне джерело та один приймач випромінювання, називають також оптопарою.

В оптронах відбувається подвійне перетворення енергії (рис. 14.1). Вхідний електричний сигнал, що характеризується силою струму I_1 або напругою U_1 , перетворюється джерелом випромінювання 1 на світловий потік Φ_1 , який передається потім оптичним каналом 2 до фотоприймача 3.

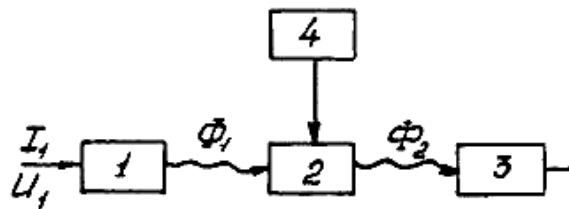


Рисунок 14.1 – Структура оптрона

Фотоприймач здійснює зворотне перетворення світлового сигналу на електричний I_2 , U_2 . Середовище оптичного каналу може бути керованим (наприклад, мати електрооптичні властивості), що відображено на рис. 14.1 як пристрій керування 4, який перетворить світловий потік Φ_1 на потік Φ_2 . Для узгодження параметрів оптронів з іншими елементами електронних схем можуть використовуватися додаткові вхідні й вихідні пристрої.

Елементарний оптрон є чотирьополусним приладом, властивості якого визначаються перш за все трьома основними характеристиками: вхідною, передавальною і вихідною. Вхідною є вольт-амперна характеристика випромінювача, а вихідною – відповідна характеристика фотоприймача (із заданим струмом на вході оптопари).

Передавальною характеристикою називають залежність струму I_2 на виході оптрона від струму I_1 на його вході; загалом ця залежність є нелінійною, що призводить до деякого спотворення форми сигналу.

Статичний коефіцієнт передачі струму: $K_I = I_2/I_1$.

Загалом, особливо за високих температур, зі значним темновим струмом I_T на виході фотоприймача: $K_I = (I_2 - I_T) / I_1$.

Для більшості типів оптопар K_I є паспортним параметром. Він може складати від 0,5 % (діодні оптопари) до 1000 % (транзисторні оптопари зі складовим фототранзистором) від номіналу.

Сумарну швидкодію оптопари характеризують часом перемикання: $t_n = t_1 + t_2$, де t_1 і t_2 – відповідно час наростання і спаду сигналу на виході оптрона. Час перемикання неоднаковий у різних типів оптопар, він залежить також від режимів їх роботи і може складати від $10^{-9} \dots 10^{-1}$ с. Окрім того, швидкодія деяких класів оптронів може бути задана граничною частотою $f_{гр}$. Залежно від типу оптрона $f_{гр} = 0,005 \dots 10$ МГц.

Розглянемо резисторні оптопари.

Як фотоприймачі оптопар цього типу використовують фоторезистори на основі CdS і CdSe. Під час засвічення фоторезисторів їх опір знижується від R_T (темнового) до $R_{СВ}$ (світлового). Одним з основних параметрів резисторних оптопар є відношення цих опорів; значення $R_T/R_{СВ}$ може сягати $10^4 \dots 10^7$.

Фоторезистори мають зазвичай велику інерційність, саме тому у фоторезисторних оптопарах як джерела випромінювання широко застосовують мініатюрні лампи розжарювання, до переваг яких слід віднести добру відтворюваність параметрів, великий термін служби, малу вартість. Невисока швидкодія (час перемикання – порядку $1 \dots 10^{-2}$ с) ламп розжарювання у оптопарах цього типу не є їх недоліком, оскільки загальний час перемикання (до 10^{-1} с) визначається фотоприймачем. Окрім ламп розжарювання в резисторних оптопарах використовують світлодіоди на основі GaP, спектр випромінювання яких добре злагоджений із спектрами збудження фотопровідності CdS - і CdSe - фотоприймачів.

Деякі характеристики резисторних оптопар зображені на рис. 14.2. Збільшення струму I_1 на вході оптрона супроводжується збільшенням світлового потоку випромінювача, унаслідок чого $R_{СВ}$ знижується (рис. 14.2, а). Підвищення температури T веде до зниження рухливості вільних носіїв заряду

у фоторезисторі, збільшення R_{CB} , а отже, до спаду I_2 з тим самим значенням напруги U_2 на виході (рис. 14.2, б).

Інерційність резисторних оптопар позначається на їх частотних характеристиках, що відображено на рис. 14.2, в (по вертикалі відкладений коефіцієнт передачі по струму).

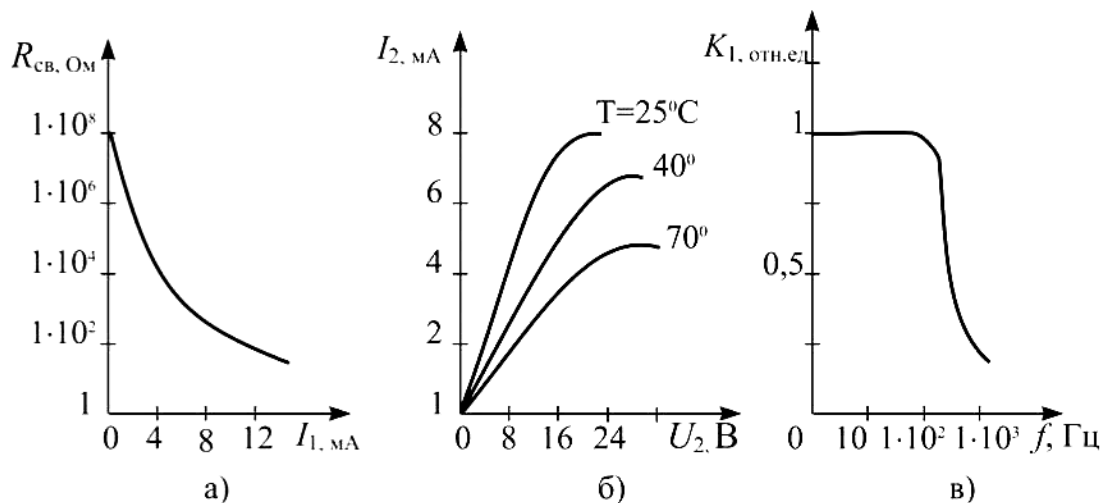


Рисунок 14.2 – Характеристики резисторних оптопар

Перевагами резисторних оптопар, що визначають їх широке застосування в різних типах оптоелектронних схем, є лінійність і симетричність вихідної характеристики (незалежність від полярності ввімкнення фоторезистора), відсутність фото-е.р.с., високе значення досяжної напруги на виході (до 250 В) і темнового опору $R_T = 10^6 \dots 10^{11} \text{ Ом}$.

У цьому стенді застосовується резисторна комутаційна оптопара ОЭП-2, де випромінювачем є лампа розжарювання.

2 Порядок виконання роботи

2.1 Скласти схему, зображену на рис. 4.3.

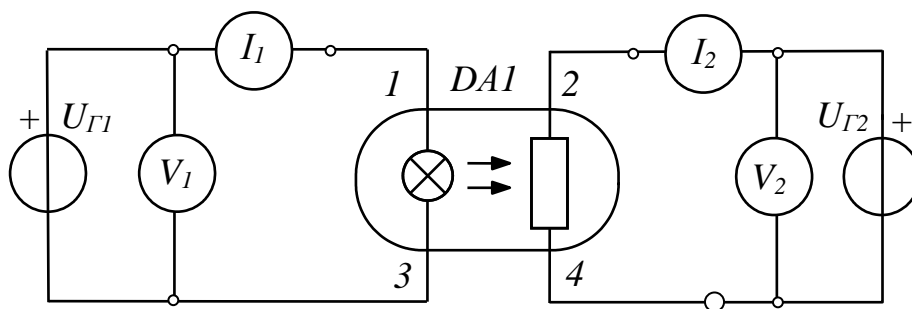


Рисунок 14.3 – Схема вимірювальної установки

2.2 Зняти вхідні вольт-амперні характеристики резисторного оптрона за різних значень вхідних напруги U_1 та струму I_1 . Результати записати до табл. 4.1.

Вхідний струм не повинен перевищувати $I_1 = 16 \text{ mA}$, а напруга – $U_1 = 5,5 \text{ V}$.

Таблиця 14.1

$U_1, \text{ B}$	0	2	3	4	5
$I_1, \text{ mA}$					
$U_2, \text{ B}$	$I_2, \text{ мкА}$				
1					
2					
3					
4					
5					

3 Оброблення результатів

3.1 Побудувати ВАХ резисторного оптрона: вхідну $I_1 = f(U_1)$ та вихідні $I_2 = f(U_2)$ за різних значень вхідного струму I_1 за даними табл. 14.1.

3.2 На вихідних характеристиках виділити лінійні ділянки і розрахувати для них опори R_{CB} як тангенс кута нахилу відповідних ділянок. Побудувати залежність опору фоторезистора від величини вхідного струму $R_{CB} = f(I_1)$.

3.3 Побудувати залежність між вхідним та вихідним струмами $I_2 = f(I_1)$ за постійної вихідної напруги $U_2 = 4 \text{ B}$. Установити межі лінійної ділянки і розрахувати для неї статичний коефіцієнт передачі струму як $K_I = I_1/I_2$.

4 Зміст звіту

4.1 Назва і мета роботи.

4.2 Схема лабораторної установки.

4.3 Таблиця результатів вимірювань.

4.4 Результати обробки експериментів у вигляді таблиці та графіків.

5 Питання, що виносять на вивчення

5.1 Що таке оптрон?

5.2 Які існують типи оптронів?

5.3 Яке функціональне призначення оптронів?

5.4 Навести основні параметри оптронів.

5.5 Які елементи використовуються в резисторних оптопарах як джерела випромінювання?

5.6 Навести основні характеристики резисторних оптопар.

5.7 Навести недоліки та переваги застосування резисторних оптопар.

Література: [1, 3, 6].

Лабораторна робота №15

Тема. Сегментні знакові індикатори

Мета: вивчення статичного способу виведення інформації на семисегментний індикатор.

1. Короткі теоретичні відомості

Цифрові індикатори складаються, зазвичай, з елементів відображення у вигляді сегментів і призначені для відображення цифрової інформації та окремих букв алфавіту.

Цифрові та буквено-цифрові індикатори бувають одно- і багаторозрядні. Під однорозрядним розуміється індикатор, що має одне знакомісце, тобто інформаційне поле індикатора або його частина, необхідна і достатня для відображення одного знака. Багаторозрядний індикатор має кілька фіксованих знакомісць.

Цифрові, буквено-цифрові, матричні та шкальні індикатори можуть бути без керування і з убудованими схемами керування.

Семисегментний індикатор (Seven-Segment Display) знаходиться на панелі компонентів Indicators (рис. 15.1, а).

Сегменти індикатора зазвичай позначаються латинськими буквами від а до g, як показано на рис. 15.1, б. Кожний вивод індикатора відповідає одному

сегменту (рис. 15.1, в); цю відповідність можна подивитись у меню елемента Help.

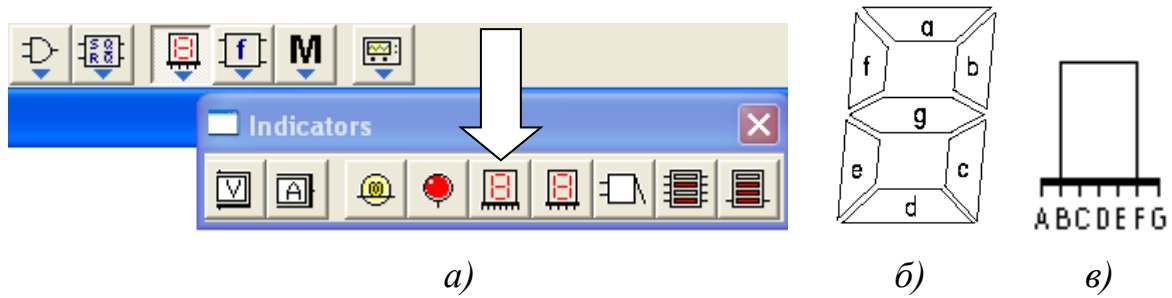


Рисунок 15.1

Таблиця 15.1

№	Зображення	Двійковий код				Сегмент індикатора						
		X ₃ (D)	X ₂ (C)	X ₁ (B)	X ₀ (A)	a	b	c	d	e	f	g
0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
2	2	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1
3	3	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1
4	4	0	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1
5	5	0	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1
6	6	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1
7	7	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
8	8	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	9	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
10	A	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1
11	B	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
12	C	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1
13	D	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1
14	E	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1
15	F	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1

Світіння сегмента відбувається, якщо на відповідний вивод індикатора подати додатну напругу (рівень логічної одиниці). Для цього можна використати джерело фіксованої напруги V_{CC} величиною +5 В, яке знаходиться на панелі компонентів Sources. Так, формування зображення цифр потребує активації певних сегментів індикатора. Цю відповідність наведено у таблиці 15.1.

На рисунку 15.2, а зображено пристрій для відображення інформації, у якому ввімкнення необхідного сегмента здійснюється за допомогою перемикача Switch з панелі компонентів Basic.

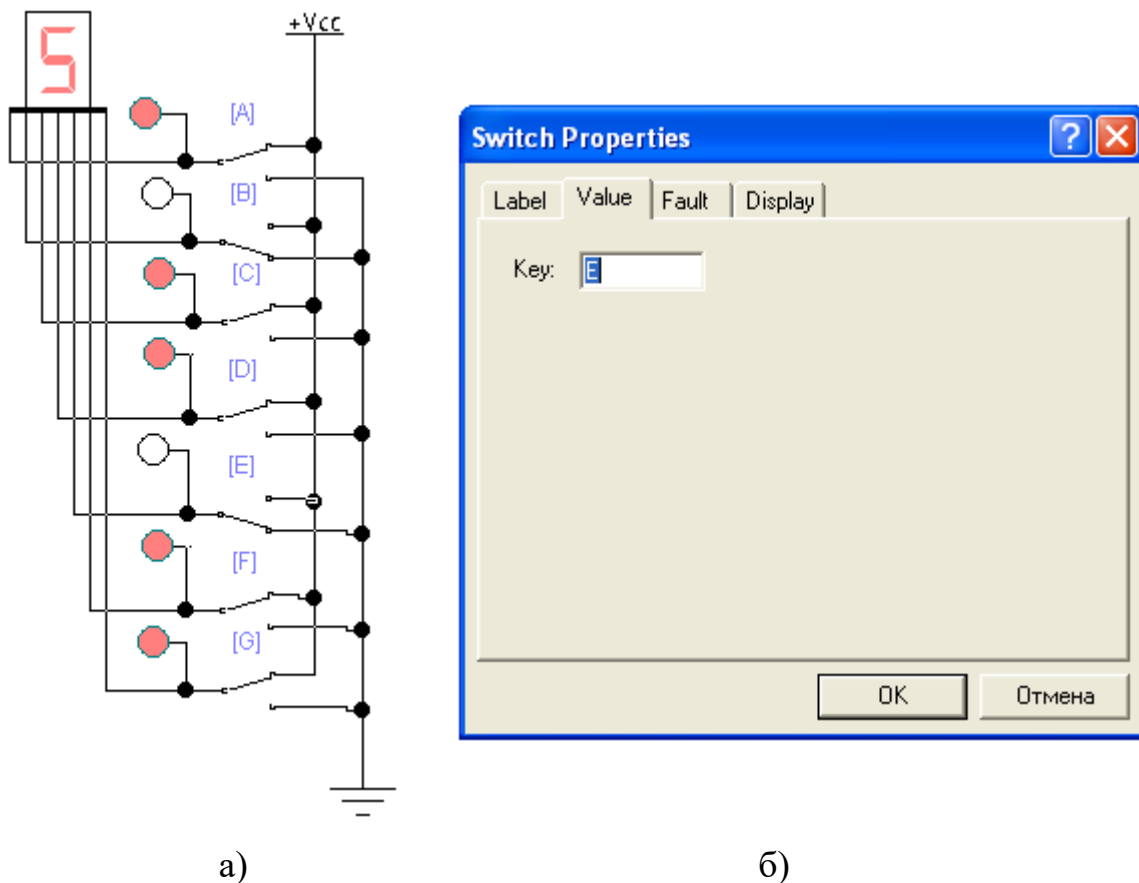




Рисунок 15.2 – Схема для статичної індикації семисегментного індикатора (а) та вікно властивостей елемента Switch (б)

Перемикання ключа з одного положення до іншого відбувається з натисненням конкретної клавіші, яку можна задати у властивостях певного елемента на вкладці Value, рис. 15.2, б (за замовчанням використовується клавіша Space). У цьому випадку для керування вибрані літери А...Г, які

відповідають позначенням сегментів індикатора. Для більш зручного візуального контролю положення ключів біля останніх увімкнені світлоіндикаторні прилади Probe  (розташований на панелі компонентів Indicators, рис. 15.1, а), які змінюють свій колір, якщо у колі присутній рівень логічної одиниці.

Перетворювач двійкового коду до керувального коду семисегментного індикатора в програмі EWB представлений мікросхемою-дешифратором 7448. Мікросхему можна знайти на панелі компонентів Digital ICs  – вкладка 74xx. Дешифратор має чотири входи А, В, С, D, на які подається двійковий код, причому А – відповідає молодшому розряду, як наведено в таблиці відповідності 15.1. Усі останні входні комбінації, що не наведені в таблиці, не мають сенсу.

Виходи мікросхеми – OA...OG мають високий потенціал.

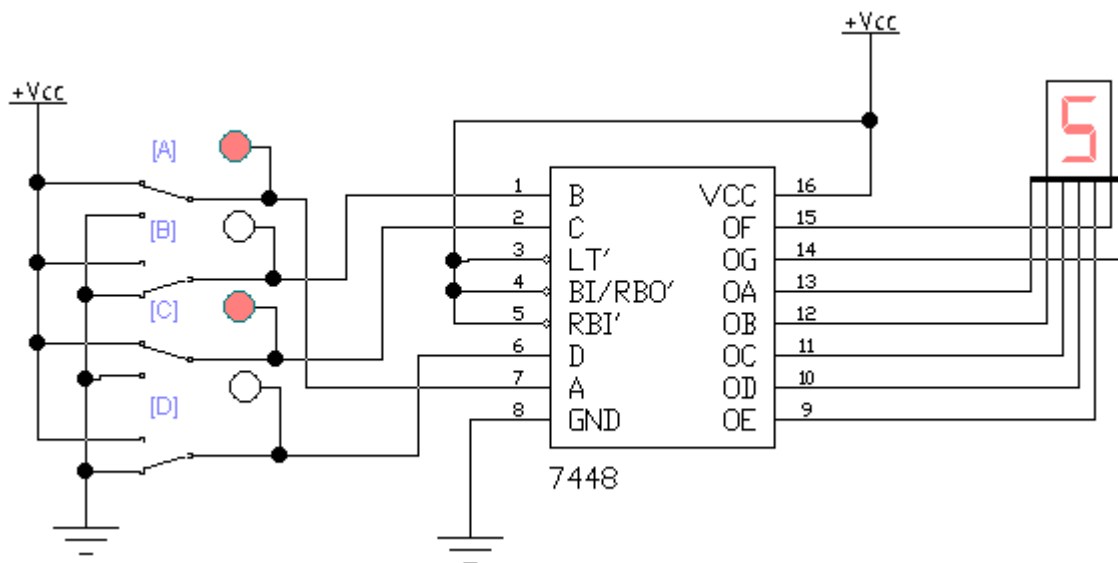



Рисунок 15.3 – Схема індикації на дешифраторі з двійкового до семисегментного коду

Також є інверсні входи: (LT) Lamp Test – контроль індикатора; (BI/RBO) – Blanking Input/ Ripple Blanking Output – вхід гасіння/ вихідний сигнал схеми послідовного гасіння; (RBI) Ripple Blanking Input – вхідний сигнал схеми послідовного гасіння. Для нормальної роботи мікросхеми на ці входи необхідно подати високий рівень напруги.

Приклад використання семисегментного індикатора разом із дешифратором наведено на рис. 15.3.

У програмі EWB є окремий знаковий індикатор із внутрішнім дешифратором, тобто об'єднує у собі двійковий дешифратор і семисегментний індикатор. Він має назву Decoded Seven-Segment Display , знаходиться на панелі компонентів Indicators (рис. 15.1, а) і має чотири входи. На відміну від попередньої схеми, додатково може відображати літери А...F, що відповідають цифрам від 10 до 15 у шістнадцятьковому коді. Відповідні кодові комбінації наведено наприкінці таблиці 15.1 у рядках, виділених сірим кольором.

2 Порядок виконання роботи

2.1 За допомогою семисегментних індикаторів та мікросхем-дешифраторів 7448 скласти схему для відображення двох останніх цифр залікової книжки.

2.2 Відобразити цифри з попереднього завдання за допомогою індикатора з убудованим дешифратором – Decoded Seven-Segment Display.

3 Зміст звіту

3.1 Назва і мета роботи.

3.2 Вихідні дані до роботи згідно з номером варіанта.

3.3 Навести схему індикації з дешифратором з програми EWB.

3.4 Навести схему індикації з убудованим дешифратором з програми EWB.

4 Питання, що виносять на вивчення

4.1 Які існують класифікації знакосинтезуючих індикаторів?

4.2 Особливості та принцип дії вакуумних люмінесцентних індикаторів.

4.3 Особливості та принцип дії рідкокристалічних індикаторів.

4.4 Особливості та принцип дії газорозрядних індикаторів.

4.5 Особливості та принцип дії напівпровідникових індикаторів.

4.6 Особливості та принцип дії електролюмінесцентних індикаторів.

Література: [1, 3, 6].

2 КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ЗНАНЬ

Критерії оцінювання знань у 6 семестрі з формою семестрового контролю – диференційований залік, наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Розподіл балів за видами занять

Вид занять, складові контролю	Кількість занять (завдань)	Максим. бал
Поточний контроль		
Лекційні заняття: відвідування, наявність конспекту та активність	15	10
Лабораторні роботи: підготовка, опрацювання результатів та оформлення звіту, захист	15	40
Тест за змістовим модулем 1		10
Тест за змістовим модулем 2		10
Тест за змістовим модулем 3		10
Підсумковий тест		20
Підсумок		100

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Васильєва Л. Д., Медведенко Б. І., Якименко Ю. І. Напівпровідникові прилади: підручник. Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка»», 2003. 338 с.
2. Волощук Ю. І. Сигнали та процеси у радіотехніці: 4 кн. Харків: Компанія СМІТ, 2003. Кн. 1. 580 с.
3. Готра З. Ю., Лопатинський І. Є., Лукіянець Б. А., Микитюк З. М., Петрович І. В. Фізичні основи електронної техніки: підручник. Львів : Видавництво «Бескид Бит», 2004. 880 с.
4. Гумен М. Б., Гуржій А. М., Співак В. М. Основи теорії електричних кіл: 3 кн. за ред. М. Б. Гумена. Київ: Вища школа, 2003.
5. Коваль Ю. О., Гринченко Л. В., Милютченко І. О., Рибін О. І. Основи теорії кіл: у 2 кн. За ред. В. М. Шокала та В. І. Правди. Харків: Компанія СМІТ, 2008.
6. Колонтаєвський Ю. П., Сосков А. Г. Промислова електроніка та мікросхемотехніка: Теорія і практикум: навч. посіб. Київ: Каравела, 2004. 432 с.
7. Мосьпан В. О. Основи радіоелектроніки. Част. І. Кременчук: КДПУ, 2003. 100 с.

Методичні вказівки щодо виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Основи електроніки» для студентів денної форми навчання зі спеціальності 123 – «Комп'ютерна інженерія» освітньо-професійної програми «Комп'ютерна інженерія» освітнього ступеня «Бакалавр»

Укладач к. т. н., доц. О. О. Юрко

Відповідальний за випуск зав. кафедри КІЕ А. Л. Перекрест

Підп. до др. _____. Формат 60×84 1/16. Папір тип. Друк ризографія.
Ум. друк. арк. _____. Наклад _____ прим. Зам. № _____. Безкоштовно.

Редакційно-видавничий відділ
Кременчуцького національного університету
імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева 20, м. Кременчук, 39600