

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО
кафедра «Електротехніка і електромеханіка
імені професора В.В.Овчарова»

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ
з дисципліни **«ПРАКТИЧНА ІНЖЕНЕРНА ПІДГОТОВКА»**
для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр»
зі спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка»

Мелітополь

2021

УДК 621.3 (078)

К32

*Дозвіл до впровадження та видання надано Вченою радою
факультету енергетики і комп'ютерних технологій
Таврійського державного агротехнологічного університету
імені Дмитра Моторного
(протокол № 4 від «24» грудня 2020 р.)*

Укладачі:

к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка і електромеханіка імені професора
В.В. Овчарова» **Квітка Сергій Олексійович**

старший викладач кафедри «Електротехніка і електромеханіка імені професора
В.В. Овчарова» **Ковальов Олександр Вікторович**

к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка і електромеханіка імені професора
В.В. Овчарова» **Нестерчук Діна Миколаївна**

к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка і електромеханіка імені професора
В.В. Овчарова» **Вовк Олександр Юрійович**

Рецензенти:

к.т.н., старший викладач кафедри «Електроенергетика і автоматизація», Таврій-
ський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного
Чебанов Андрій Борисович

к.т.н., доцент кафедри «Електротехніка і електромеханіка імені професора
В.В. Овчарова» **Попова Ірина Олексіївна**

Квітка С.О., Ковальов О.В., Нестерчук Д.М., Вовк О.Ю.

К32 Лабораторний практикум з дисципліни «Практична інженерна підготовка».
Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2021. 205 с.

В лабораторному практикумі зібраний, систематизований та наочно викладений теоретичний і методичний матеріал, який охоплює практичні питання поглиблення та закріплення придбаних знань при вивченні навчальних дисциплін «Теоретичні основи електротехніки», «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології», «Електричні машини», «Електроніка та мікросхемотехніка» та «Електронні пристрої в системах керування» методами аналітичної та експериментальної перевірки основних положень теорії і практики. Структура кожної лабораторної роботи, їх зміст та наочна ілюстрація теоретичного матеріалу схемами вимірювання є методично обґрунтованими, а практикум є зручним для самостійного опрацювання матеріалу здобувачами ступеню вищої освіти, як денної, так й заочної (дистанційної) форм навчання.

Лабораторний практикум призначений для здобувачів ступеня вищої освіти «Бакалавр» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

© ТДАТУ, 2020 рік

ЗМІСТ

1. Вступ	5
2. Лабораторна робота «Дослідження лінії електропередачі змінного струму»	6
3. Лабораторна робота «Метрологічна повірка аналогового ватметра методом безпосереднього порівняння зі зразковим приладом»	18
4. Лабораторна робота «Вимірювання електричних величин у трифазних колах змінного струму»	29
5. Лабораторна робота «Дослідження роботи цифрових вимірювальних приладів при вимірюванні електричних величин»	46
6. Лабораторна робота «Дослідження енергетичних параметрів силового трансформатора за паспортними даними»	61
7. Лабораторна робота «Дослідження методики розрахунку втрат та побудови графіку ККД силового трансформатора»	70
8. Лабораторна робота «Дослідження методики розрахунку та побудови зовнішніх характеристик силового трансформатора»	81
9. Лабораторна робота «Дослідження енергетичних показників і величин, що визначають властивості асинхронного електродвигуна з к.з. ротором за паспортними даними»	92
10. Лабораторна робота «Дослідження методики розрахунку та побудови робочих характеристик асинхронного електродвигуна з к.з. ротором»	102
11. Лабораторна робота «Дослідження методики розрахунку та побудови моментної та механічної характеристик асинхронного електродвигуна з к.з. ротором»	113
12. Лабораторна робота «Розробка та дослідження стабілізованого джерела живлення постійної напруги»	125

13. Лабораторна робота «Розробка та дослідження інтегральних стабілізаторів напруги»	150
14. Лабораторна робота «Розрахунок однофазного регулятора змінної напруги»	163
15. Лабораторна робота «Розробка та дослідження підсилювачів електричних сигналів»	180
16. Додаток А	196
17. Додаток Б	198
18. Додаток В	200
19. Додаток Г	202
20. Додаток Д	204
21. Додаток Е	205

ВСТУП

Лабораторні роботи є одним з основних видів навчальних занять студентів при вивченні навчальної дисципліни «Практична інженерна підготовка» здобувачами ступеню вищої освіти «Бакалавр».

Метою проведення лабораторних робіт є:

- поглиблення та закріплення придбаних знань при вивченні навчальних дисциплін «Теоретичні основи електротехніки», «Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології», «Електричні машини», «Електроніка та мікроелектротехніка» та «Електронні пристрої в системах керування» методами аналітичної та експериментальної перевірки основних положень теорії і практики;
- здійснення вимірювань та оцінка їх результатів з урахуванням вимог до їх точності;
- придбання практичних навичок самостійної пізнавальної діяльності при вирішенні творчих комплексних задач.

Найважливішою умовою ефективності навчання при проведенні лабораторних робіт з навчальної дисципліни є обов'язкова самостійна пізнавальна робота студента і чітке розуміння цілей, змісту та методики виконання лабораторних робіт. Наведені критерії оцінювання лабораторних робіт дозволять студентам володіти кількісною інформацією щодо балів за виконання кожного виду завдань.

Для плідної самостійної пізнавальної роботи студентам пропонується робочі зошити для виконання лабораторних робіт, які містять такі структурні блоки, що дозволять в процесі підготовки до лабораторних робіт та в процесі підготовки звіту опанувати практичні навички з поглиблення теоретичних знань, що дозволить здійснити практичну реалізацію придбаних знань щодо використання електроенергії в енергетичному обладнанні та в засобах вимірювань.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при визначенні величин та параметрів, що характеризують роботу лінії електропередачі у лінійному нерозгалуженому електричному колі синусоїдного струму з активно-індуктивним навантаженням.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- означення показників, які характеризують лінію електропередачі: втрата напруги в лінії, спадання напруги в лінії, абсолютне відхилення напруги на затискачах навантаження, відносне відхилення напруги на затискачах навантаження [1, с. 332–341, 2, с.96-100];

Ознайомитись з:

- принципами побудови векторної діаграми лінійного нерозгалуженого електричного кола синусоїдного струму з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням [2, с.96];

- аналітичними виразами для визначення величин та параметрів, які характеризують лінійне нерозгалужене електричне коло синусоїдного струму з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням, а саме: еквівалентний реактивний опір кола; еквівалентний повний опір кола; струм у колі з лінією електропередачі і навантаженням; напруга на затискачах навантаження; втрата напруги в лінії електропередачі; спадання напруги в лінії електропередачі; відхилення напруги на затискачах навантаження; втрата активної потужності в лінії електропередачі; реактивна потужність, яка споживається лінією електропередачі; повна потужність, яка споживається лінією електропередачі; коефіцієнт потужності лінії електропередачі; кут зсуву фаз лінії електропередачі; активна потужність навантаження; реактивна потужність навантаження; повна потужність навантаження; коефіцієнт потужності навантаження; кут зсуву фаз

навантаження; активна, реактивна та повна потужність кола; коефіцієнт потужності кола; кут зсуву фаз кола.

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...6, рисунок 1 - Принципова електрична схема експериментальної установки;
- висновок за результатами проведених досліджень.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 1».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Поясніть які фізичні явища спостерігаються в лінії електропередачі і навантаженні активно-індуктивного характеру при живленні від джерела синусоїдного струму.

2. Що таке спадання напруги в лінії електропередачі?

3. Що таке втрата напруги в лінії електропередачі?

4. Що таке абсолютне відхилення напруги на затискачах навантаження?

5. Що таке відносне відхилення напруги на затискачах навантаження?

6. Поясніть, коли спадання і втрата напруги в лінії дорівнюють одне одному? Як вони співвідносяться в іншому випадку?

7. За якої умови по лінії електропередачі змінного струму можна передати максимальну потужність навантаженню?

8. Як розрахувати величини та параметри, які характеризують лінійне нерозгалужене електричне коло синусоїдного струму з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням?

1.3 Рекомендована література

1. Овчаров В.В. Теоретичні основи електротехніки, частина 1 / В.В. Овчаров. – Мелітополь : Люкс, 2007. – 389 с.

2. Загальна електротехніка: Навчальний посібник для студентів вищ.навч.закл., які навчаються за напрямом підготовки «Процеси, машини та обладнання агропромислового виробництва» / В.В. Овчаров, О.Ю.Вовк. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. – 310 с.

2. Основні теоретичні відомості

Розглянемо лінійне нерозгалужене електричне коло, яке містить ідеальне джерело, лінію електропередачі та активно-індуктивне навантаження.

Розрахункова схема електричного кола наведена на рисунку 2.1, згідно якої напруга на затискачах джерела дорівнює напрузі на його затискачах (тобто $u_1 = e$), опори прямого й зворотного проводів лінії електропередачі r_L та x_L зосереджуються в одному місці, активно-індуктивне навантаження представлено параметрами r_H та x_H .

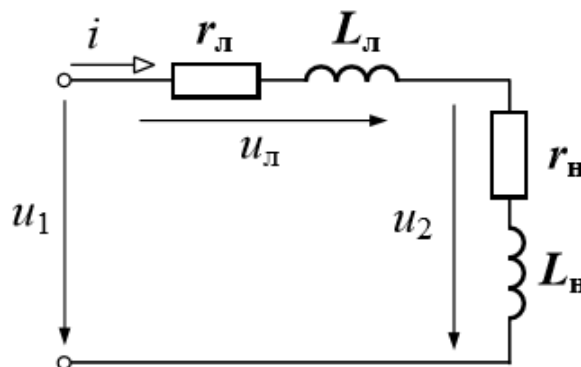


Рисунок 2.1 – Розрахункова схема лінійного нерозгалуженого електричного кола з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням

Розглянемо фізичні явища, що спостерігаються в лінії електропередачі і навантаженні при живленні від джерела синусоїдного струму:

- під дією синусоїдної е.р.с. джерела в лінії електропередачі та в навантаженні активно-індуктивного характеру протікає струм;
- спостерігається теплова дія струму;

- явище електромагнетизму та електромагнітної індукції в навантаженні активно-індуктивного характеру.

На рисунку 2.2 наведена векторна діаграма електричного кола з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням, при цьому $i = I_m \sin \omega t$.

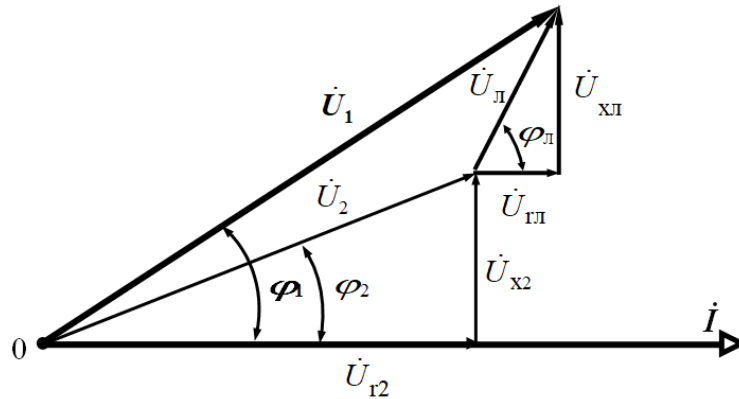


Рисунок 2.2 - Векторна діаграма електричного кола з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням

Діюче значення струму в електричному колі дорівнює

$$I = \frac{U_1}{\sqrt{(r_l + r_n)^2 + (x_l + x_n)^2}}, \quad (1)$$

де r_l - активний опір лінії електропередачі, Ом;

x_l - реактивний опір лінії електропередачі, Ом;

r_n - активний опір навантаження, Ом;

x_n - реактивний опір навантаження, Ом.

Діюче значення напруги на затискачах навантаження дорівнює

$$U_2 = z_n \cdot I, \quad (2)$$

де z_n - повний опір навантаження, Ом;

$$z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2}. \quad (3)$$

Розглянемо показники, які характеризують лінію електропередачі:

- **втрата напруги в лінії**, ΔU_l – це різниця між значеннями напруги на початку, U_1 , та в кінці лінії, U_2 , яка визначається за формулою

$$\Delta U_{\text{л}} = U_1 - U_2; \quad (4)$$

- *спадання напруги в лінії*, $U_{\text{л}}$ – це добуток повного опору лінії, $Z_{\text{л}}$, та діючого значення струму, I , що проходить по електричному колу, згідно формули

$$U_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cdot I, \quad (5)$$

де
$$Z_{\text{л}} = \sqrt{r_{\text{л}}^2 + x_{\text{л}}^2}. \quad (6)$$

- *абсолютне відхилення напруги на затискачах навантаження*, $\delta U_{\text{н}}$ – це різниця між напругою на затискачах навантаження, U_2 , й номінальною напругою навантаження, $U_{\text{н(ном)}}$, згідно формули

$$\delta U_{\text{н}} = U_2 - U_{\text{н(ном)}}. \quad (7)$$

- *відносне відхилення напруги на затискачах навантаження*, $\delta U_{\text{н}\%}$ – це відношення абсолютного відхилення напруги на затискачах навантаження, $\delta U_{\text{н}}$, до номінальної напруги навантаження, $U_{\text{н(ном)}}$, виражене у відсотках

$$\delta U_{\text{н}\%} = \frac{\delta U_{\text{н}}}{U_{\text{н(ном)}}} \cdot 100. \quad (8)$$

Спадання і втрата напруги в лінії дорівнюють одне одному за умовою рівності кута зсуву фаз навантаження куту зсуву фаз лінії електропередачі $\varphi_2 = \varphi_{\text{л}}$. Абсолютне значення втрати напруги на ділянці кола менш, ніж абсолютне значення спадання напруги на цій же ділянці кола згідно виразу $|\Delta U_{\text{л}}| < |U_{\text{л}}|$. По лінії електропередачі змінного струму можна передати максимальну потужність навантаженню за умовою, якщо повний опір навантаження, Z_2 , буде дорівнювати повному опору лінії, $Z_{\text{л}}$.

Для визначення величин та параметрів, які характеризують лінійне нерозгалужене електричне коло синусоїдного струму з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням застосовуються аналітичні вирази:

- втрата активної потужності в лінії: $\Delta P_{\text{л}} = r_{\text{л}} \cdot I_2$;

- реактивна потужність, яка споживається лінією електропередачі: $\Delta Q_{\text{л}} = x_{\text{л}} \cdot I_2$;

- повна потужність, яка споживається лінією електропередачі: $\Delta S_{\text{л}} = x_{\text{л}} \cdot I_2$;
- коефіцієнт потужності лінії електропередачі: $\frac{\Delta P_{\text{л}}}{\Delta S_{\text{л}}} = \cos \varphi_{\text{л}}$;
- кут зсуву фаз лінії: $\varphi_{\text{л}} = \arccos \frac{r_{\text{л}}}{z_{\text{л}}}$;
- активна потужність навантаження: $P_2 = r_{\text{н}} \cdot I$;
- реактивна потужність навантаження: $Q_2 = x_{\text{н}} \cdot I$;
- повна потужність навантаження: $S_2 = z_{\text{н}} \cdot I^2$;
- коефіцієнт потужності навантаження: $\frac{P_2}{S_2} = \cos \varphi_{\text{н}}$;
- кут зсуву фаз навантаження: $\varphi_{\text{н}} = \arccos \frac{r_{\text{н}}}{z_{\text{н}}}$;
- еквівалентний активний опір кола: $r = r_{\text{л}} + r_{\text{н}}$;
- еквівалентний реактивний опір кола: $x = x_{\text{л}} + x_{\text{н}}$;
- повний опір кола: $z = \sqrt{r^2 + x^2}$;
- активна потужність кола: $P = r \cdot I$;
- реактивна потужність кола: $Q = x \cdot I$;
- повна потужність кола: $S = z \cdot I^2$;
- коефіцієнт потужності кола: $\cos \varphi = \frac{P}{S}$;
- кут зсуву фаз кола: $\varphi = \arccos \frac{r}{z}$.

3. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з електровимірювальними приладами та апаратурою, що застосовуються в роботі.
2. Записати метрологічні характеристики електровимірювальних приладів в таблицю 1 звіту до лабораторної роботи.
3. Зібрати схему електричну принципову експериментальної установки, що наведена на рисунку 1 звіту до лабораторної роботи.
4. Здійснити вимірювання електричних величин – сили струму, напруги та активної потужності за показаннями приладів для двох умов проведення експериментальних досліджень:
 - умова 1: вимикачі QS1, QS2 замкнені;
 - умова 2: вимикач QS1 замкнений, а вимикач QS2 розімкнений.

5. Результати вимірювань для двох умов проведення експериментальних досліджень навести в таблиці 2.

6. За результатами вимірювань згідно умови 1 розрахувати фізичні величини, що характеризують лінійне нерозгалужене електричне коло синусоїдного струму з активно-індуктивним навантаженням.

7. Результати розрахунків навести в таблиці 3.

8. За результатами вимірювань згідно умови 2 розрахувати фізичні величини, що характеризують лінійне нерозгалужене електричне коло синусоїдного струму з лінією електропередачі та з активно-індуктивним навантаженням.

9. Результати розрахунків навести в таблиці 4.

10. Розрахувати фізичні величини, що характеризують параметри лінії електропередачі в лінійному нерозгалуженому електричному колі синусоїдного струму з активно-індуктивним навантаженням.

11. Результати розрахунків навести в таблиці 5.

12. За даними таблиці 4 та 5 визначити величини, що характеризують роботу лінії електропередачі і електричного кола.

13. Результати розрахунків навести в таблиці 6.

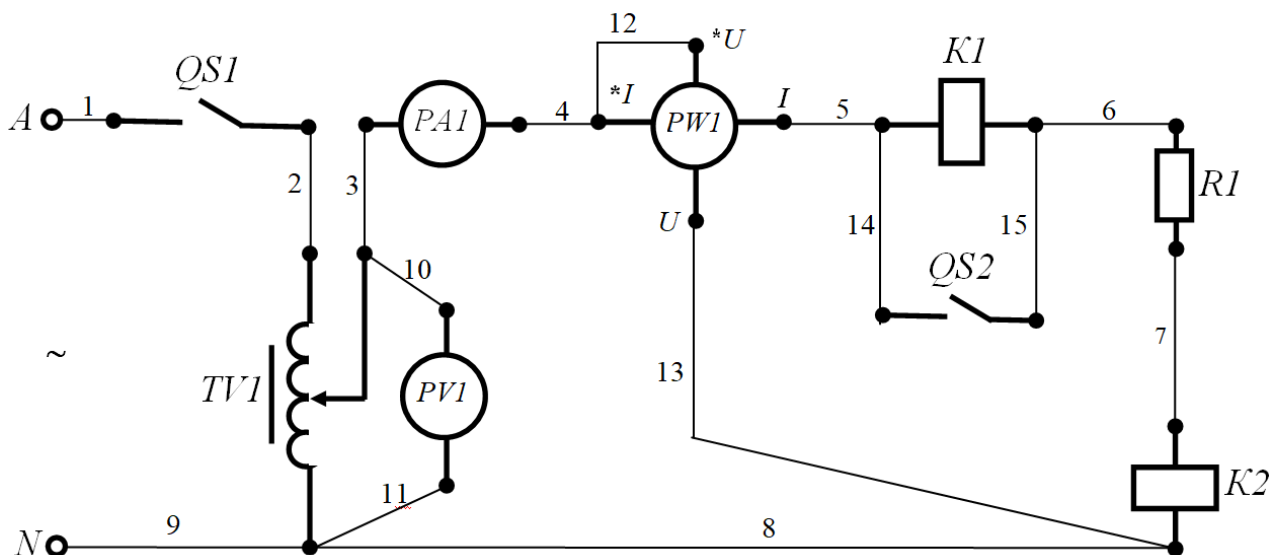
14. Сформулювати висновок за результатами проведених досліджень.

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Метрологічні характеристики електровимірювальних приладів

Найменування позначення	P_A	P_V	P_W
Тип приладу			
Система (умовне позначення)			
Границя вимірювання за напругою, V			
Границя вимірювання за струмом, A			
Клас точності			
Рід струму			
Спосіб установки шкали приладу			
Умови експлуатації			
Напруга випробування, kV			
Номинальна частота чи розширений діапазон частот, $Гц$			



TV1 – лабораторний автотрансформатор; *PV1* – вольтметр;
PA1 – амперметр; *K1* – котушка; *R1* – резистор; *K2* – котушка,
 які імітують активно-індуктивне навантаження;

PW1 – ватметр; *QS1*, *QS2* – вимикачі; 1 – 15 – з'єднувальні проводи

3. Рисунок 1 – Принципова електрична схема експериментальної установки

4. Таблица 2 – Результати експериментальних досліджень

Умови проведення експерименту	Показання приладів		
	діюче значення напруги на затискачах кола, U_n, B	діюче значення сили струму в колі, I, A	активна потужність, що споживається колом, P_n, Bm
Умова 1: вимикачі <i>QS1</i> , <i>QS2</i> замкнені			
Умова 2: вимикач <i>QS1</i> замкнений; вимикач <i>QS2</i> розімкнений	діюче значення напруги на затискачах кола, U, B	діюче значення сили струму в колі, I, A	активна потужність, що споживається колом, P, Bm

5. Таблиця 3 – Результати розрахунків величин згідно умови 1

(вимикачі QS1, QS2 замкнені)

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Активний опір навантаження	$r_n, \text{Ом}$	згідно формули $P_n = r_n \cdot I^2$	$r_n =$
Повний опір навантаження	$z_n, \text{Ом}$	згідно формули $I = \frac{U_n}{z_n}$	$z_n =$
Реактивний опір навантаження	$x_n, \text{Ом}$	згідно формули $z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2}$	$x_n =$
Кут зсуву фаз між напругою та струмом навантаження	$\varphi_n, \text{град.}$	$\varphi_n = \arccos \frac{r_n}{z_n}$	$\varphi_n =$
Комплекс повного опору навантаження	$Z_n, \text{Ом}$	алгебраїчна форма	
		$Z_n = r_n + jx_n$	$Z_n =$
		показова форма	
		$Z_n = z_n \cdot e^{j\varphi_n}$	$Z_n =$

6. Таблиця 4 – Результати розрахунків величин згідно умови 2 (вимикач QS1 замкнений, QS2 розімкнений)

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Активний опір електричного кола	$r, \text{Ом}$	згідно формули $P = r \cdot I^2$	$r =$
Повний опір електричного кола	$z, \text{Ом}$	згідно формули $I = \frac{U_n}{z_n}$	$z =$
Реактивний опір електричного кола	$x, \text{Ом}$	згідно формули $z_n = \sqrt{r^2 + x^2}$	$x =$

Продовження таблиці 4

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Кут зсуву фаз між напругою та струмом електричного кола	φ , град.	$\varphi = \arccos \frac{r}{z}$	$\varphi =$
Комплекс повного опору електричного кола	Z , Ом	алгебраїчна форма	
		$Z = r + jx$	$Z =$
		показова форма	
		$Z = z \cdot e^{j\varphi_n}$	$Z =$

7. Таблиця 5 – Результати розрахунків параметрів лінії електропередачі

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Активний опір лінії електропередачі	r_l , Ом	згідно формули $r = r_l + r_n$	$r_l =$
Реактивний опір лінії електропередачі	x_l , Ом	згідно формули $x = x_l + x_n$	$x_l =$
Повний опір лінії електропередачі	z_l , Ом	$z_l = \sqrt{r_l^2 + x_l^2}$	$z_l =$
Кут зсуву фаз між спаданням напруги і струмом в лінії електропередачі	φ , град.	$\varphi_l = \arccos \frac{r_l}{z_l}$	$\varphi_l =$
Комплекс повного опору навантаження	Z_l , Ом	алгебраїчна форма	
		$Z_l = r_l + jx_l$	$Z_l =$
		показова форма	
		$Z_l = z_l \cdot e^{j\varphi_l}$	$Z_l =$

Продовження таблиці 6

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Комплекс повної потужності лінії електропередачі в показовій та алгебраїчній формах	$\tilde{S}_l, VA$	$\tilde{S}_l = \dot{U}_l \cdot \dot{I}^* = P_l + jQ_l$	$\tilde{S}_l =$
Коефіцієнт потужності лінії електропередачі	$\cos \varphi_l, в.о.$	$\cos \varphi_l = \frac{P_l}{S_l}$	$\cos \varphi_l =$

8. Висновок за результатами проведених досліджень.

Лабораторна робота
МЕТРОЛОГІЧНА ПОВІРКА АНАЛОГОВОГО ВАТМЕТРА
МЕТОДОМ БЕЗПОСЕРЕДНЬОГО ПОРІВНЯННЯ
ЗІ ЗРАЗКОВИМ ПРИЛАДОМ

Мета роботи:

Практичне застосування набутих навичок при проведенні метрологічної повірки аналогового ватметра методом безпосереднього порівняння показів із показами зразкового ватметра та опрацювання результатів повірки.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- означення метрологічної повірки аналогових приладів;
- означення мети метрологічної повірки та види метрологічних повірок;
- основні операції метрологічної повірки аналогового приладу;
- умовні позначення класу точності приладів, та як за ними обчислюється стандартна непевність показів приладів.

Ознайомитись з:

- методами метрологічної повірки аналогових приладів [1, с.187-195, 2, с.611-634; 3, с.120-133, с.108-114, 3, с.45-52];
- положеннями метрологічної повірки приладів прямого перетворення [4, с.55-59];
- аналітичними виразами для визначення величин, які характеризують результати метрологічної повірки приладу, а саме: стандартна непевність результату вимірювання дійсного значення активної напруги зразковим ватметром; стандартна непевність показів ватметра, що повіряється; абсолютні похибки ватметра, що повіряється; границя відхилення показу від дійсного значення ватметра, що повіряється; абсолютна варіація показів зразкового ватметра.

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;

- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1, 2, рисунок 1 - Схема повірки ватметра методом безпосереднього порівняння показів із показами зразкового ватметра; рисунок 2 - Графіки залежностей допустимих $\Delta_{PV_{\Pi, зр}}$ та експериментальних $\Delta_{PW_{\Pi} \uparrow}$, $\Delta_{PW_{\Pi} \downarrow}$ абсолютних похибок ватметра, що повіряється, у функції його показів;
- висновок за результатами проведених досліджень стосовно придатності ватметра, що повіряється, для подальшого застосування;

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 2».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. У чому суть метрологічної повірки аналогових приладів та яка її мета?
2. Які існують види метрологічних повірок?
3. Який прилад можна вважати зразковим?
4. Охарактеризуйте методи метрологічної повірки.
5. Охарактеризуйте основні операції метрологічної повірки аналогового ватметра.
6. Які є умовні позначення класу точності приладів, та як за ними обчислюється стандартна непевність показів приладів?

1.3 Рекомендована література

1. Дорожовець М.М. та ін. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За ред. Стадника Б. – Т.1: Основи метрології. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 532 с.
2. Нестерчук Д.М. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. – 256 с.

3. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.

4. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій / Д.М. Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. – 256 с.

2. Основні теоретичні відомості

Метою метрологічної повірки є встановлення придатності засобу вимірювальної техніки (ЗВТ) до застосування на основі експериментального визначення його метрологічних характеристик і контролю їх відповідності встановленим нормам. Засоби вимірювальної техніки, що виготовляються або підлягають ремонту, ввозяться з-за кордону, знаходяться в експлуатації та на зберіганні, підлягають метрологічній повірці згідно з «Закон України про метрологію та метрологічну діяльність» та ДСТУ 2708-99 «Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки. Організація і порядок проведення»;

Види метрологічної повірки: державна, відомча, первинна, періодична, позачергова, інспекційна, вибіркова, поелементна, експертна та автономна;

Вимоги до засобу вимірювальної техніки (ЗВТ), який є зразковим:

- зразковий ЗВТ повинен бути інваріантним до умов вимірювань і властивостей досліджуваних об'єктів, тобто ні умови вимірювань, ні властивості об'єктів не повинні впливати на його метрологічні характеристики;
- зразковий ЗВТ повинен бути призначений для вимірювань тих самих фізичних величин чи параметрів вимірювальних сигналів, що й ЗВТ, що повіряється, або тих величин, які передбачені методом повірки;
- діапазон вимірювань зразкового ЗВТ або діапазон зміни значень зразкової міри повинні бути більшими, ніж діапазон вимірювань ЗВТ, що повіряється;
- похибка вимірювання зразковим ЗВТ або сумарна похибка вимірювання зразковими ЗВТ, $\delta_{ЗР,ЗР}$, не повинна перевищувати $1/\alpha$ від значення похибки ЗВТ, що

повіряється, $\delta_{\text{ПОВ,зр.}}$, при вимірюванні ними одного і того самого значення вимірюваної величини, тобто

$$\delta_{\text{ЗР,зр}} \leq \frac{1}{\alpha} \cdot \delta_{\text{ПОВ,зр}}, \quad (1)$$

де $1/\alpha$ - співвідношення між похибками зразкового ЗВТ та ЗВТ, що повіряється.

Значення співвідношення α між похибками $\delta_{\text{ЗР,зр}}$ та $\delta_{\text{ПОВ,зр}}$ може набувати такі значення: 1:2; 1:2,5; 1:3; 1:4; 1:5 та 1:10.

Співвідношення 1:3 є достатнім для того, щоб похибка зразкового ЗВТ істотно не впливала на результати повірки. На основі співвідношення (1) можна визначити необхідний клас точності зразкового ЗВТ: для повірки приладу прямого перетворення (амперметра, вольтметра та ватметра), клас точності якого встановлено у вигляді основної допустимої зведеної похибки $\gamma_{\text{П,зр}}$ за виразом

$$\gamma_{\text{ЗР,зр}} \leq \alpha \cdot \gamma_{\text{П,зр}} \cdot \frac{X_{\text{К.П}}}{X_{\text{К.ЗР}}}, \quad (2)$$

де α - співвідношення між похибками зразкового ЗВТ та ЗВТ, що повіряється;

$$\alpha = 1/3; 1/4; 1/5;$$

$X_{\text{К.П}}$, $X_{\text{К.ЗР}}$ - границі вимірювань ЗВТ, що повіряється, та зразкового;

Для повірки приладів на змінному струмі застосовуються такі методи повірки:

- метод порівняння за допомогою компаратора для амперметрів класів точності 0,1...0,2;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими амперметрами та метод порівняння за допомогою компаратора для амперметрів класів точності 0,5...5,0;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими вольтметрами та метод порівняння із зразковими вольтметрами для вольтметрів класів точності 1,0...5,0;
- метод порівняння за допомогою компаратора для ватметрів класів точності 0,1...0,2;
- метод безпосереднього порівняння із зразковими ватметрами і варметрами та метод порівняння за допомогою компаратора для ватметрів та варметрів класів точності 0,5...5,0;

На підготовчому етапі повірки приладів необхідно вибрати метод повірки, схему повірки та зразкові засоби вимірювальної техніки згідно ДСТУ2708-99, що регламентує вимоги до метрологічної повірки амперметрів, вольтметрів, ватметрів і варметрів.

Під час повірки виконуються такі операції: зовнішній огляд приладу; перевірка роботоздатності приладу; визначення впливу нахилу на покази приладу; перевірка електричної міцності ізоляції і визначення опору ізоляції; визначення основної похибки та варіації показів; встановлення величини «неповернення» показника на нульову позначку шкали; визначення часу заспокоєння рухомої частини приладу; розрахунок похибки спрацювання контактної пристрою; визначення похибки реєстрації показів.

Найпоширенішим методом метрологічної повірки аналогових приладів є метод безпосереднього порівняння ЗВТ, що повіряється, із зразковим ЗВТ, який застосовується в галузі електричних та магнітних вимірювань для повірки приладів прямого перетворення: амперметрів, вольтметрів, ватметрів, частотомірів, омметрів, та в галузі вимірювань механічних величин – для повірки манометрів та витратомірів. Основою методу є одночасне вимірювання одного й того самого значення фізичної величини зразковим приладом та приладом, що повіряється. За результатами вимірювань порівнюють показання приладу, що повіряється, X_{Π} , з показаннями зразкового приладу, $X_{ЗР}$, та визначають похибку, Δ , приладу, що повіряється, за формулою

$$\Delta = X_{\Pi} - X_{ЗР}. \quad (3)$$

Регульованим джерелом вимірюваної величини встановлюють відповідну позначку шкали з цифрою і для неї за показами двох приладів визначають похибку приладу за формулою (3).

Перевагами методу є простота реалізації та відсутність складного вимірювального обладнання, недоліком – практична неможливість автоматизації повірки аналогових приладів.

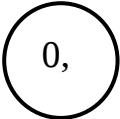
Основні характеристики точності ЗВТ, а також властивості, що впливають на його точність, регламентує узагальнена характеристика приладу – клас

точності. Відповідно до класів точності чинні стандарти встановлюють границі основних похибок для певних типів засобів вимірювань.

За класом точності ЗВТ можна обчислити його стандартну непевність. **Непевність** – це параметр, який пов'язаний із результатом вимірювання, який характеризує розкид можливих значень величини навколо одержаного результату, які обґрунтовано можна приписати вимірюваній величині. **Стандартна непевність** є середньоквадратичною мірою розкиду можливих значень вимірюваної величини навколо результату вимірювання. Її позначають як $u(x)$ – за першою літерою англійського слова «uncertainty». У дужках вказують назву величини, яку вимірюють. Одиницею стандартної непевності є одиниця вимірюваної величини, а саме, одиницею стандартної непевності результату вимірювання сили струму $u(I)$ є одиниця сили струму – А.

Умовні позначення класу точності приладів та аналітичні вирази для визначення стандартних непевностей результатів вимірювання наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Позначення класів точності ЗВТ та формули для визначення стандартних непевностей результатів вимірювання

Позначення класу точності		Формула для обчислення границі відхилень показу приладу від дійсного значення	Вираз для обчислення стандартної непевності результату вимірювання
на засобі вимірювання	в технічній документації		
0,5	клас точності 0,5	$\Delta_{x,zp} = \pm \frac{\gamma_{zp} \cdot X_K}{100\%}$	$u(x) = \frac{\Delta_{x,zp}}{\sqrt{3}} = \frac{\gamma_{zp} \cdot X_K}{100\% \cdot \sqrt{3}}$
	клас точності 0,1	$\Delta_{x,zp} = \pm \frac{\delta_{zp} \cdot x}{100\%}$	$u(x) = \frac{\Delta_{x,zp}}{\sqrt{3}} = \frac{\delta_{zp} \cdot x}{100\% \cdot \sqrt{3}}$
для цифрових приладів 0,05/0,02	клас точності 0,05/0,02	$\Delta_{x,zp} = \pm \left[\frac{d \cdot X_K}{100\%} + \frac{(c-d) \cdot x}{100\%} \right]$	$u_c(x) = \frac{\Delta_{x,zp}}{\sqrt{3}} = \left[\frac{d \cdot X_K + (c-d) \cdot x}{100\% \cdot \sqrt{3}} \right]$

Примітка до таблиці:

$\Delta_{x,зр}$ - границя відхилень показу приладу від дійсного значення;

$\gamma_{зр}, \delta_{зр}$ - класи точності аналогових приладів;

X_K – границя вимірювання приладу;

x – виміряне значення величини;

c – клас точності цифрового приладу при кінцевому значенні $x = X_K$;

d - клас точності цифрового приладу при нульовому значенні $x = 0$.

3. Порядок виконання роботи

1. Записати метрологічні характеристики ватметра, що повіряється, та зразкового ватметра в таблицю 1 звіту до лабораторної роботи.

2. Обчислити стандартні непевності показів ватметра, що повіряється, та зразкового ватметра згідно формул (1) та (2) звіту до лабораторної роботи.

3. Зібрати електричне коло за схемою повірки ватметра, що наведена на рисунку 2 звіту до лабораторної роботи. В схемі на лабораторному стенді встановлене регульоване джерело живлення - лабораторний автотрансформатор TV , з діапазоном регулювання напруги $0...250$ В, який призначений для плавної зміни напруги, а також для плавної зміни струму в схемі застосовується регулювальний реостат R_p .

4. Після перевірки та включення схеми викладачем необхідно прогріти вимірювальний механізм ватметра, що повіряється, протягом 15 хвилин за номінального значення відхилення показчика приладу.

5. Виконати повірку ватметра, що повіряється, $PW_{п}$, методом безпосереднього порівняння показів із показами зразкового ватметра $PW_{зр}$. Для визначення основної похибки та варіації показів необхідно плавно (без коливань) слід змінювати величину активної потужності, при цьому показчик ватметра, що повіряється, слід встановлювати на позначку шкали з цифрою *двічі*: при збільшенні активної потужності – умовний «хід вверх» та при зменшенні активної потужності – умовний «хід вниз».

6. За показами зразкового ватметра записати покази при збільшенні активної потужності, $N_{PW_{3P}\uparrow}$, та при зменшенні активної потужності, $N_{PW_{3P}\downarrow}$, а також розрахувати відповідні дійсні значення активної потужності, $P_{PW_{3P}\uparrow}$, і, $P_{PW_{3P}\downarrow}$, за виразами (3) та (4) звіту до лабораторної роботи. Результати повірки навести в таблиці 2 звіту до лабораторної роботи.

7. За результатами експериментів опрацювати результати повірки згідно алгоритму, який наведений в пункті 7 звіту до лабораторної роботи.

8. Побудувати графіки залежностей допустимих та експериментальних абсолютних похибок ватметра, що повіряється, у функції його показів - рисунок 2 звіту до лабораторної роботи.

9. Сформулювати висновок стосовно придатності ватметра для подальшого застосування, в якому слід порівняти обчислені значення абсолютної похибки ватметра, що повіряється, з обчисленими значеннями границі відхилень показу від дійсного значення активної потужності за показами зразкового ватметра.

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Метрологічні характеристики ватметрів

Найменування позначення	Ватметр	
	зразковий	що повіряється
Тип приладу		
Система (умовне позначення)		
Границя вимірювання за напругою, V		
Границя вимірювання за струмом, A		
Клас точності		
Рід струму		
Спосіб установки шкали приладу		
Умови експлуатації		
Напруга випробування, κV		
Номінальна частота чи розширений діапазон частот, $Гц$		

3. Обчислення величини стандартної непевності результату вимірювання дійсного значення активної напруги зразковим ватметром за формулою [3, 4]

$$u(P)_{PW_{3P}} = \frac{\gamma_{PW_{3P}, \varepsilon P} \cdot U_{K, PW_{3P}} \cdot I_{K, PW_{3P}}}{100\% \cdot \sqrt{3}}, \quad (1)$$

де $\gamma_{PW_{3P}, \varepsilon P}$ - клас точності зразкового ватметра, %;

$U_{K, PW_{3P}}$ - границя вимірювання за напругою зразкового ватметра, В;

$I_{K, PW_{3P}}$ - границя вимірювання за струмом зразкового ватметра, А.

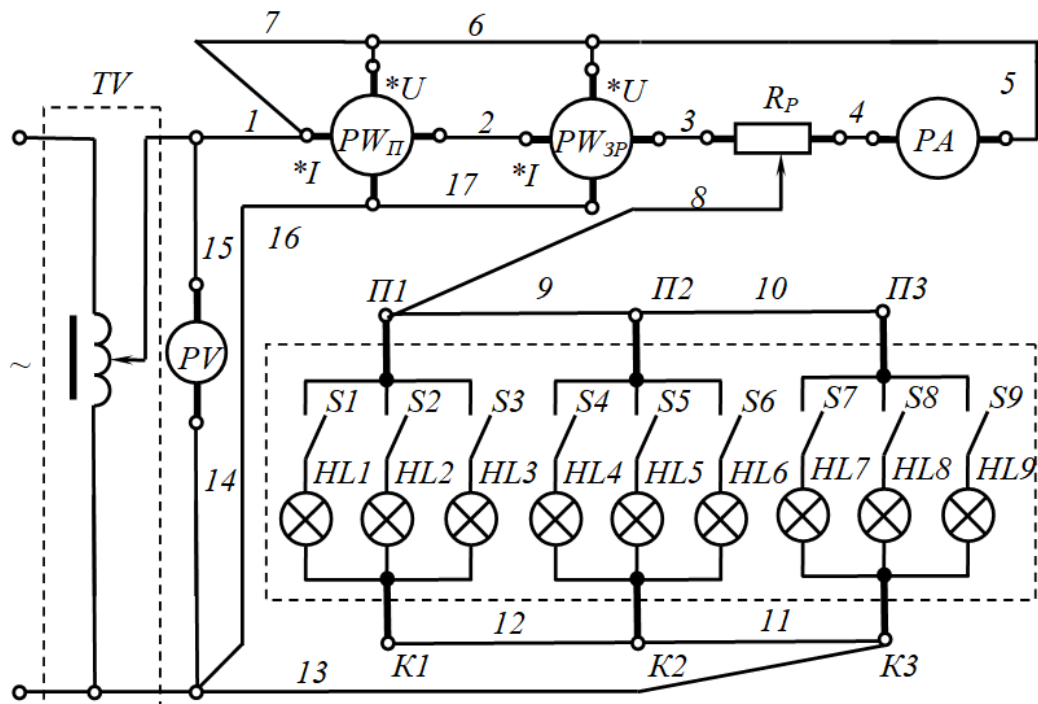
4. Обчислення величини стандартної непевності показів ватметра, що повіряється, за формулою [3, 4]

$$u(P)_{PW_{II}} = \frac{\gamma_{PW_{II}, \varepsilon P} \cdot U_{K, PW_{II}} \cdot I_{K, PW_{II}}}{100\% \cdot \sqrt{3}}, \quad (2)$$

де $\gamma_{PW_{II}, \varepsilon P}$ - клас точності ватметра, що повіряється, %;

$U_{K, PW_{II}}$ - границя вимірювання за напругою ватметра, що повіряється, В;

$I_{K, PW_{II}}$ - границя вимірювання за струмом ватметра, що повіряється, А.



5. Рисунок 1 - Схема повірки ватметра методом безпосереднього порівняння показів із показами зразкового ватметра

Примітка до рисунку 1: TV – лабораторний автотрансформатор; PW_{II} – ватметр, що повіряється; PW_{3P} – зразковий ватметр; PV – вольтметр; PA – амперметр; R_P – регулювальний реостат; $S1 \dots S9$ – тумблери; $HL1 \dots HL9$ – освітлювальне навантаження; $III \dots I3$ – затискачі «початки секцій навантаження»; $K1 \dots K3$ – затискачі «кінці секцій навантаження»; $1 \dots 17$ – з'єднувальні проводи

6. Таблица 2 – Результати повірки ватметра

№ досліду	Величини, що вимірювались			Величини, що обчислювались						
	Показ ватметра, що повіряється	Показ зразкового ватметра		Постійна зразкового ватметра	Дійсне значення активної Потужності за показами зраз- кового ватметра		Абсолютна похибка ватметра, що повіряється		Границі відхилення показу PV_{II} від дійсного значення активної потужності	Абсолютна варіація
		$N_{PW_{3P}\uparrow}$, поділ	$N_{PW_{3P}\downarrow}$, поділ		$P_{PW_{3P}\uparrow}$, Вт	$P_{PW_{3P}\downarrow}$, Вт	$\Delta_{PW_{3P}\downarrow}$, Вт	$\Delta_{PW_{3P}\uparrow}$, Вт		
1	$P_{PW_{II}}$, Вт			$C_{PW_{3P}}$, Вт/поділ					$\Delta_{PW_{II},3P}$, Вт	В, Вт
2										
3										
4										
5										

7. Алгоритм опрацювання результатів повірки ватметра:

- визначення дійсних значень активної потужності за показами зразкового ватметра

$$P_{PW_{3P}\uparrow} = C_{PW_{3P}} \cdot N_{PW\uparrow}; \quad (3)$$

$$P_{PW_{3P}\downarrow} = C_{PW_{3P}} \cdot N_{PW\downarrow}, \quad (4)$$

де $C_{PW_{3P}}$ - постійна зразкового ватметра, Вт/поділ.;

- визначення абсолютних похибок ватметра, що повіряється, за виразами

$$\Delta_{P_{W_{II}} \uparrow} = P_{P_{W_{II}}} - P_{P_{W_{3P}} \uparrow}; \quad (5)$$

$$\Delta_{P_{W_{II}} \downarrow} = P_{P_{W_{II}}} - P_{P_{W_{3P}} \downarrow}; \quad (6)$$

- визначення границі відхилення показу від дійсного значення ватметра, що повіряється, за виразом

$$\Delta_{P_{W_{II}}, ep} = \pm \frac{\gamma_{P_{W_{II}}, ep} \cdot U_{K, P_{W_{II}}} \cdot I_{K, P_{W_{II}}}}{100\%}, \quad (7)$$

де $\gamma_{P_{W_{II}}, ep}$ - клас точності ватметра, що повіряється, %;

$U_{K, P_{W_{II}}}$ - границя вимірювання за напругою ватметра, що повіряється, В;

$I_{K, P_{W_{II}}}$ - границя вимірювання за струмом ватметра, що повіряється, А;

- визначення абсолютної варіації показів за виразом [3]

$$B = \left| P_{P_{W_{3P}} \uparrow} - P_{P_{W_{3P}} \downarrow} \right|. \quad (8)$$



8. Рисунок 2 - Графіки залежностей допустимих, $\Delta_{P_{V_{II}}, ep}$,

та експериментальних, $\Delta_{P_{W_{II}} \uparrow}$, $\Delta_{P_{W_{II}} \downarrow}$, абсолютних похибок

ватметра, що повіряється, у функції його показів

9. Висновок стосовно придатності ватметра, що повіряється, для подальшого застосування.

Лабораторна робота
ВИМІРЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН
У ТРИФАЗНИХ КОЛАХ ЗМІННОГО СТРУМУ

Мета роботи:

Практичне застосування набутих навичок при проведенні вимірювань струму, напруги, активної потужності, реактивної потужності та коефіцієнту потужності у трифазних колах змінного струму.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- схеми вимірювань струму, напруги, активної потужності, реактивної потужності та коефіцієнту потужності в трифазних колах змінного струму при різних характеристиках навантаження та при схемах з'єднання;
- аналітичні вирази для визначення струму, напруги, активної потужності, реактивної потужності та коефіцієнту потужності в трифазних колах змінного струму при різних характеристиках навантаження та при схемах з'єднання.

Ознайомитись з:

- методами вимірювань струму, напруги, активної потужності, реактивної потужності та коефіцієнту потужності в трифазних колах змінного струму при різних характеристиках навантаження та при схемах з'єднання [1, с. 100-166, 2, с. 8-32, с. 33-54, с. 55-61, с.62-73, с.74-82, с. 83-101, с. 102-120, 3, с.178...196, 232...234, 4, с.245-438];

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...5, рисунок 1 - Схема електрична принципова вимірювання фазного (лінійного) струму, фазної та лінійної напруги, активної потужності кола, реактивної потужності кола та коефіцієнту потужності кола у трифазному трипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за

схемою «зірка»; рисунок 2 - Схема електрична принципова вимірювання фазного (лінійного) струму, фазної та лінійної напруги та активної потужності кола у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним та несиметричним освітлювальним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка»; рисунок 3 - Схема принципова електрична вимірювання реактивної потужності у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка», якщо струм навантаження більший, ніж границя вимірювання приладів;

- висновок щодо практичної значущості методів вимірювання електричних величин у трифазних колах змінного струму.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 3».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Охарактеризуйте методи вимірювання струму у трифазних колах змінного струму при симетричному характері навантаження.
2. Охарактеризуйте методи вимірювання струму у трифазних колах змінного струму при несиметричному характері навантаження.
3. Які вимірювальні перетворювачі застосовуються для розширення діапазону вимірювання амперметрів при вимірюваннях у колах змінного струму?
4. Наведіть схеми вимірювання струму в трифазних колах змінного струму.
5. Охарактеризуйте методи вимірювання напруги у трифазних колах змінного струму при симетричному характері навантаження.
6. Охарактеризуйте методи вимірювання напруги у трифазних колах змінного струму при несиметричному характері навантаження.
7. Які вимірювальні перетворювачі застосовуються для розширення діапазону вимірювання вольтметрів при вимірюваннях у колах змінного струму?

8. Наведіть схеми вимірювання напруги в трифазних колах змінного струму.

9. Охарактеризуйте методи вимірювання активної потужності в трифазних колах змінного струму.

10. Охарактеризуйте методи вимірювання реактивної потужності в трифазних колах змінного струму.

11. Який метод необхідно обрати для одночасного вимірювання активної та реактивної потужності в трифазному трипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаження? Як аналітично визначаються активна та реактивна потужність трифазного трипровідного кола за вище обраним методом?

12. Поясніть від чого залежить кількість ватметрів при вимірюванні активної та реактивної потужності в трифазних колах змінного струму?

13. Охарактеризуйте засоби та методи для вимірювання коефіцієнту потужності в трифазних колах змінного струму.

1.3 Рекомендована література

1. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук, С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.

2. Нестерчук Д.М. Методи і засоби вимірювань електричних та неелектричних величин: навчальний посібник / Д.М.Нестерчук, С.О.Квітка, С.В.Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. - 206 с.

3. Дорожовець М.М. та З1ед. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т./ М. Дорожовець, Мотало В., Стадник Б., Василюк В., Борек Р., Ковальчик А.; За З1ед.. Стадника Б. – Т.2: Вимірювальна техніка. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – 654 с.

2. Основні теоретичні відомості

Методи вимірювання струму у трифазних колах змінного струму при симетричному характері навантаження:

- метод одного амперметра для вимірювання лінійного (фазного) струму при з'єднанні навантаження за схемою «зірка»;
- метод одного амперметра для вимірювання лінійного струму та одного амперметра для вимірювання фазного струму при з'єднанні навантаження за схемою «трикутник»;

Значення вимірюваних лінійних (фазних) струмів визначаються за виразом

$$I_A = I_B = I_C = I_{PA}.$$

Методи вимірювання струму у трифазних колах змінного струму при несиметричному характері навантаження:

- метод трьох амперметрів для вимірювання лінійного (фазного) струму при з'єднанні навантаження за схемою «зірка».

Значення вимірюваних лінійних (фазних) струмів визначаються за вира-

зами $I_A = I_{PA1}$; $I_B = I_{PA2}$; $I_C = I_{PA3}$;

- метод трьох амперметрів для вимірювання лінійного струму та трьох амперметрів для вимірювання фазного струму при з'єднанні навантаження за схемою «трикутник».

Значення вимірюваних лінійних струмів визначаються за виразом

$I_A = I_B = I_C = I_{PA\Delta}$. Значення вимірюваних фазних струмів визначаються за виразом $I_{av} = I_{вс} = I_{са} = I_{PA\phi}$.

Вимірювальні перетворювачі - вимірювальні трансформатори струму застосовуються для розширення діапазону вимірювання амперметрів при вимірюваннях у трифазних колах змінного струму.

В таблиці 2.1 наведені схеми вимірювання струму в трифазних колах змінного струму.

Таблиця 2.1 - Схеми вимірювання струму в трифазних колах змінного струму

Найменування схеми	Схема
Схема вимірювання лінійних (фазних) струмів одним PA у симетричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка»	
Схема вимірювання лінійних одним PA_L та фазних струмів одним PA_ϕ у симетричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»	
Схема вимірювання лінійних (фазних) струмів трьома $PA1 \dots PA3$ у несиметричному трифазному колі при увімкненні споживачів за схемою «зірка»	
Схема вимірювання струмів з трьома $PA1 \dots PA3$ та двома вимірювальними трансформаторами струму $TA1 \dots TA2$ у трифазному трипровідному колі змінного струму при несиметричному характері навантаження	$I_A = I_{PA1} \cdot k_{IH}; \quad I_B = I_{PA2} \cdot k_{IH};$ $I_C = I_A + I_B = I_{PA3} \cdot k_{IH}.$
Схема вимірювання струмів з чотирма $PA1 \dots PA4$ та трьома трансформаторами струму $TA1 \dots TA3$ у трифазному чотирипровідному колі змінного струму при несиметричному характері навантаження	$I_N = I_A + I_B + I_C = I_{PA4} \cdot k_{IH}.$

Методи вимірювання напруги у трифазних колах змінного струму при симетричному характері навантаження:

- метод одного вольтметра для вимірювання лінійної напруги та одного вольтметра для вимірювання фазної напруги у трифазному трипровідному колі змінного струму при з'єднанні навантаження за схемою «зірка».

Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за виразом $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{PV_L}$. Значення вимірюваних фазних напруг визначаються за виразом $U_A = U_B = U_C = U_{PV_\phi}$.

- метод одного вольтметра для вимірювання лінійної (фазної) напруги при з'єднанні навантаження за схемою «трикутник» у трифазному трипровідному колі змінного струму. Значення вимірюваних лінійних (фазних) напруг визначаються за виразом $U_A = U_B = U_C = U_{PV}$.

- метод одного вольтметра для вимірювання лінійної напруги та одного вольтметра для вимірювання фазної напруги у трифазному чотирипровідному колі змінного струму.

Методи вимірювання напруги у трифазних колах змінного струму при несиметричному характері навантаження:

- метод трьох вольтметрів для вимірювання лінійної напруги у трифазному трипровідному колі змінного струму.

Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за виразом

$$U_{AB} = U_{PV1}; U_{BC} = U_{PV2}; U_{CA} = U_{PV3};$$

- метод трьох вольтметрів для вимірювання фазної напруги у трифазному трипровідному колі змінного струму при з'єднанні навантаження за схемою «зірка». Значення вимірюваних лінійних напруг визначаються за виразом

$$U_a = U_{PV1}; U_b = U_{PV2}; U_c = U_{PV3}.$$

Вимірювальні перетворювачі – вимірювальні трансформатори напруги застосовуються для розширення діапазону вимірювання вольтметрів при вимірюваннях у колах змінного струму.

В таблиці 2.2 наведені схеми вимірювання напруги в трифазних колах змінного струму.

Таблиця 2.2 - Схеми вимірювання напруги в трифазних колах змінного струму

Найменування схеми	Схема
Схема вимірювання лінійних та фазних напруг у симетричному трифазному трипровідному колі змінного струму при увімкненні споживачів за схемою «зірка»	
Схема вимірювання лінійних (фазних) напруг у симетричному трифазному трипровідному колі змінного струму при увімкненні споживачів за схемою «трикутник»	
Схема вимірювання лінійних та фазних напруг у симетричному трифазному чотирипровідному колі змінного струму	
Схема вимірювання лінійних напруг у несиметричному трифазному трипровідному колі змінного струму	
Схема вимірювання лінійних напруг у несиметричному трифазному колі із застосуванням вимірювальних трансформаторів напруги	$U_{AB} = U_{PV1} \cdot k_{UH}; U_{BC} = U_{PV2} \cdot k_{UH};$ $U_{CA} = U_{PV3} \cdot k_{UH}$

Методи вимірювання активної потужності в трифазних колах змінного струму:

- прямий метод за допомогою трифазного ватметра;
- метод вимірювання активної потужності у чотирипровідному несиметричному трифазному колі за методом трьох ватметрів. Виміряне значення активної потужності кола дорівнює $P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}$;
- метод вимірювання активної потужності у чотири провідному симетричному трифазному колі за методом одного ватметра. Виміряне значення активної потужності кола дорівнює $P_{\text{кола}} = 3 \cdot P_{PW}$;
- метод вимірювання активної потужності у трипровідному несиметричному трифазному колі за методом двох ватметрів. Виміряне значення активної потужності кола дорівнює $P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2}$;
- для розширення границь вимірювання струму струмові кола ватметрів вмикають через вимірювальні трансформатори струму, а при вимірюванні у колах, де напруга перевищує 600 В, застосовують вимірювальні трансформатори напруги. Виміряне значення активної потужності кола визначається за виразом $P_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot k_{IH} \cdot k_{UH}$ - рисунок 1.

Методи вимірювання реактивної потужності в трифазних колах змінного струму:

- прямий метод за допомогою трифазного варметра;
- метод вимірювання реактивної потужності трифазних споживачів методом трьох ватметрів в трифазних чотири провідних колах змінного струму. Виміряне значення реактивної потужності трифазного кола дорівнює $Q_{\text{кола}} = \frac{P_{PW1} + P_{PW2} + P_{PW3}}{\sqrt{3}}$;
- метод вимірювання реактивної потужності трифазних споживачів методом одного ватметра в трифазних трипровідних колах змінного струму з симетричним характером навантаження. Виміряне значення реактивної потужності трифазного кола дорівнює $Q_{\text{кола}} = P_{PW} \cdot \sqrt{3}$;

- метод вимірювання реактивної потужності за методом двох ватметрів, які увімкнені за схемою зі штучною нульовою точкою. Виміряне значення реактивної потужності трифазного кола дорівнює $Q_{\text{кола}} = (P_{PW1} + P_{PW2}) \cdot \sqrt{3}$;

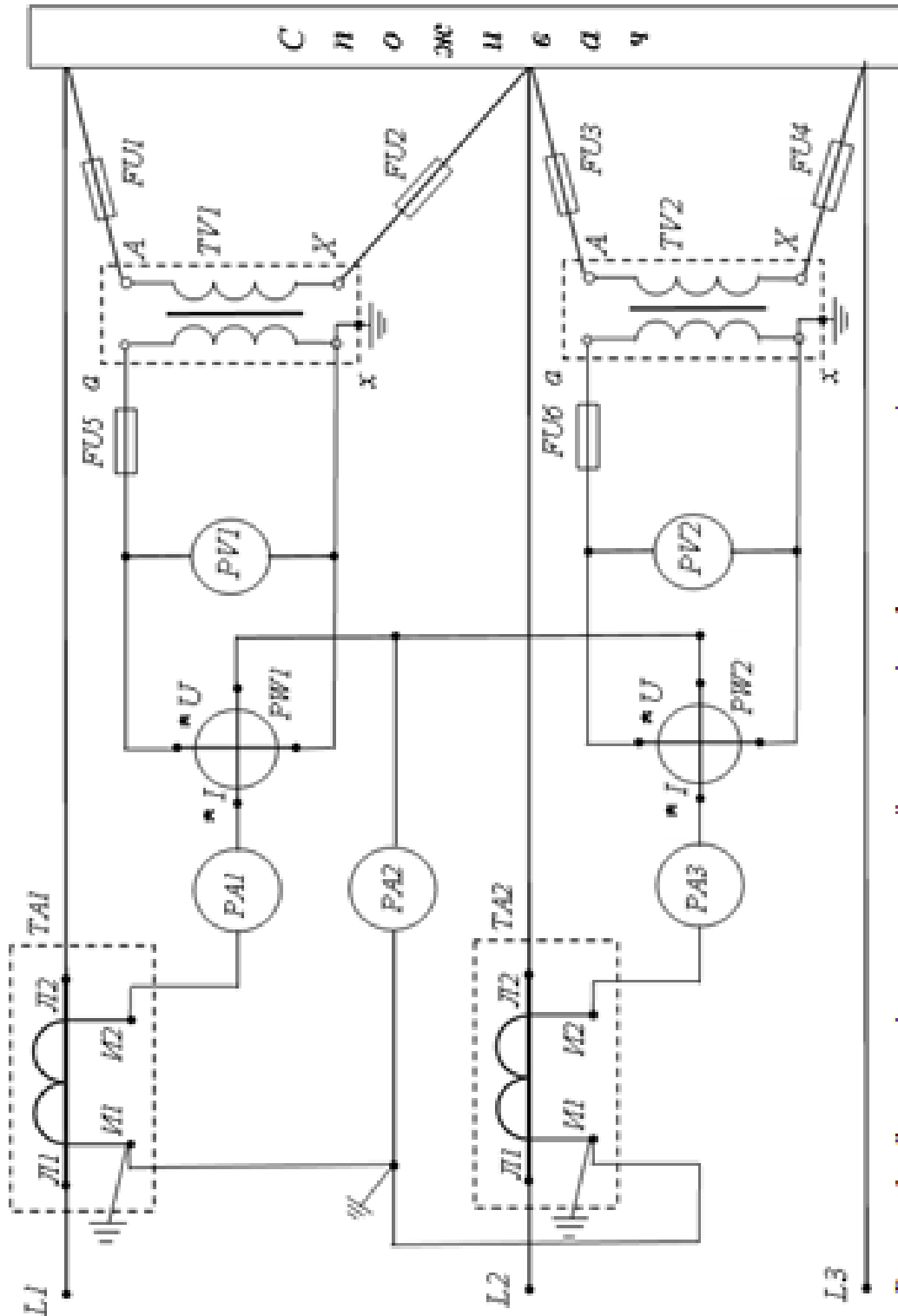


Рисунок 1 – Схема вимірювання активної потужності трифазних споживачів з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги

- метод вимірювання реактивної потужності за методом двох ватметрів, які включені за cos-схемою у разі повної симетрії трифазного кола. Виміряне значення реактивної потужності дорівнює $Q_{\text{кола}} = (P_{PW2} - P_{PW1}) \cdot \sqrt{3}$.

Для одночасного вимірювання активної та реактивної потужності в трифазному трипровідному колі змінного струму при симетричному характері навантаження застосовується метод двох ватметрів, які включені за cos-схемою.

Активна потужність та реактивна потужність трифазного трипровідного кола визначаються за виразами відповідно

$$P_{\text{кола}} = P_{PW1} + P_{PW2}; \quad Q_{\text{кола}} = (P_{PW2} - P_{PW1}) \cdot \sqrt{3}.$$

Кількість ватметрів при вимірюванні активної та реактивної потужності в трифазних колах змінного струму залежить від характеру навантаження: симетричне та несиметричне; від виду трифазного кола: три провідне та чотирипровідне.

Класифікація засобів та методів для вимірювання коефіцієнту потужності в трифазних колах змінного струму наведена на рисунку 2.2.

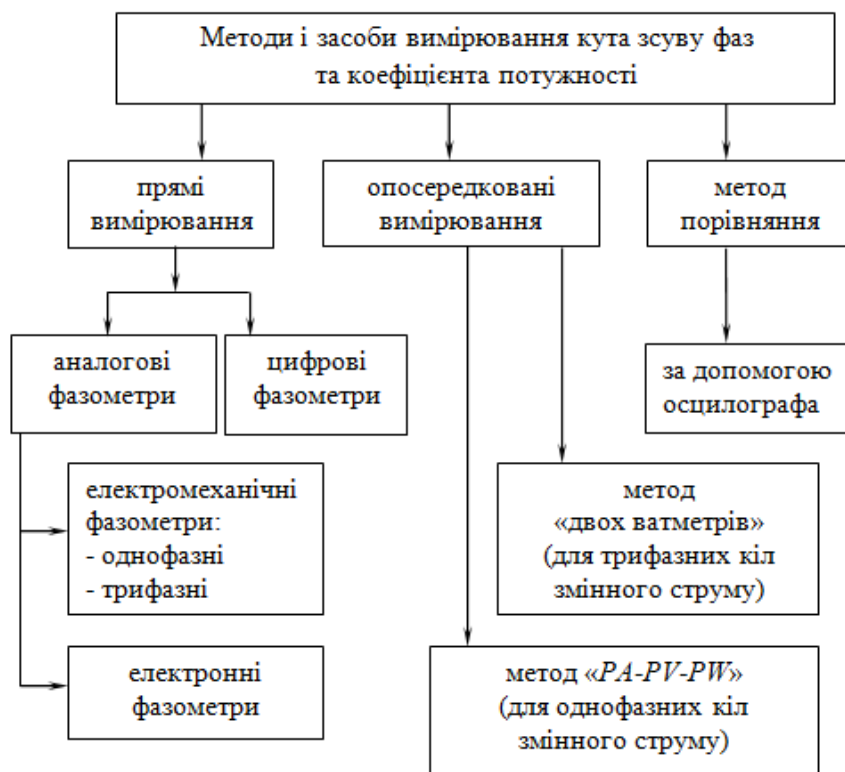


Рисунок 2.2 - Класифікація засобів та методів для вимірювання коефіцієнту потужності в трифазних колах змінного струму

3. Порядок виконання роботи

1. Обрати методи вимірювання електричних величин:

- фазного (лінійного) струму;
- фазної та лінійної напруги;
- активної потужності кола;
- реактивної потужності кола (непряме вимірювання);
- коефіцієнту потужності (пряме вимірювання)

у трифазному трипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка».

У якості електричного навантаження пропонується застосувати трифазний асинхронний електродвигун з к.з. ротором. Схема підключення клемної панелі асинхронного електродвигуна до трифазного кола змінного струму наведена в додатку А.1. Схема підключення трифазного фазометра до трифазного трипровідного кола наведена в додатку А.2 до лабораторної роботи.

2. Найменування обраних методів вимірювання електричних величин навести в таблиці 1 звіту до лабораторної роботи. Наявність розрахункових формул в таблиці обов'язкова.

3. Обрати та записати метрологічні характеристики електровимірювальних приладів, що використовуються в роботі, в таблицю 2 звіту до лабораторної роботи.

3. Розробити принципову електричну схему вимірювання фазного (лінійного) струму, фазної та лінійної напруги, активної потужності, реактивної потужності та коефіцієнту потужності у трифазному трипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка» - рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

4. Зібрати розроблену схему та здійснити вимірювання (обчислення) у трифазному трипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка», за обраними методами. Результати вимірювань та обчислень навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи.

5. Обрати методи вимірювання електричних величин:

- фазного (лінійного) струму;
- фазної та лінійної напруги;
- активної потужності;

у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним та несиметричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка».

6. Найменування обраних методів вимірювання електричних величин навести в таблиці 4 звіту до лабораторної роботи. Наявність розрахункових формул в таблиці обов'язкова.

7. Розробити принципову електричну схему вимірювання фазного (лінійного) струму, фазної та лінійної напруги та активної потужності у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним та несиметричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка» - рисунок 2 звіту до лабораторної роботи.

У якості електричного навантаження пропонується застосувати освітлювальні секції, струм в яких регулюється тумблерами. Схема підключення електричного освітлювального навантаження та тумблерів наведена в додатку А.3.

8. Зібрати розроблену схему та здійснити вимірювання (обчислення) у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним та з несиметричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка», за обраними методами. Результати вимірювань та обчислень навести в таблиці 5 звіту до лабораторної роботи.

9. Розробити принципову електричну схему вимірювання реактивної потужності у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка», якщо струм навантаження більший, ніж границя вимірювання за струмом приладів – рисунок 3 звіту до лабораторної роботи.

10. Навести розрахункову формулу для визначення реактивної потужності трифазного чотири провідного кола змінного струму за розробленою схемою.

11. Сформулювати висновок щодо практичної значущості методів вимірювання електричних величин у трифазних колах змінного струму.

4. Зміст звіту

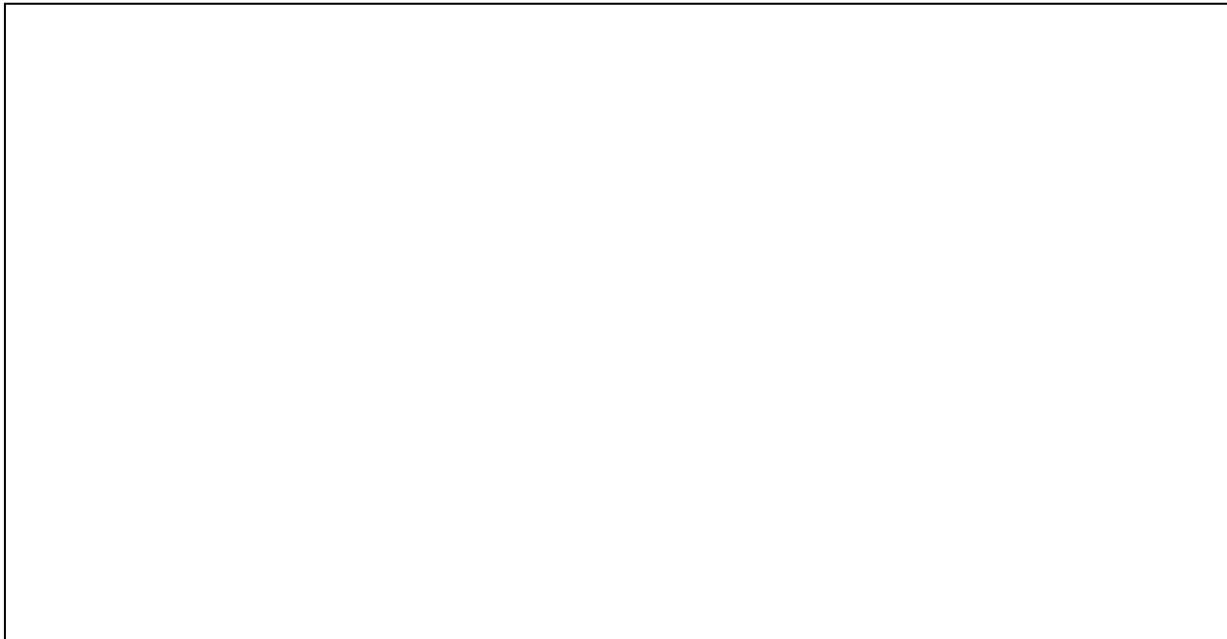
1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Найменування методів вимірювання електричних величин у трифазному трипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка»

Найменування електричної величини	Найменування методу вимірювання та розрахункові формули
1. Фазний (лінійний) струм	
2. Фазна напруга	
3. Лінійна напруга	
4. Активна потужність кола	
5. Реактивна потужність кола (непряме вимірювання)	
6. Коефіцієнт потужності кола (пряме вимірювання)	

3. Таблиця 2 - Основні метрологічні характеристики приладів

Найменування позначення	Прилад			
	PV	PA	PW	фазометр
Тип приладу				
Система (умовне позначення)				
Границя вимірювання за напругою, V				
Границя вимірювання за струмом, A				
Клас точності				
Рід струму				
Спосіб установки шкали приладу				
Умови експлуатації				
Напруга випробування, kV				
Номінальна частота чи розширений діапазон частот, $Гц$				
Заводський номер, рік випуску				



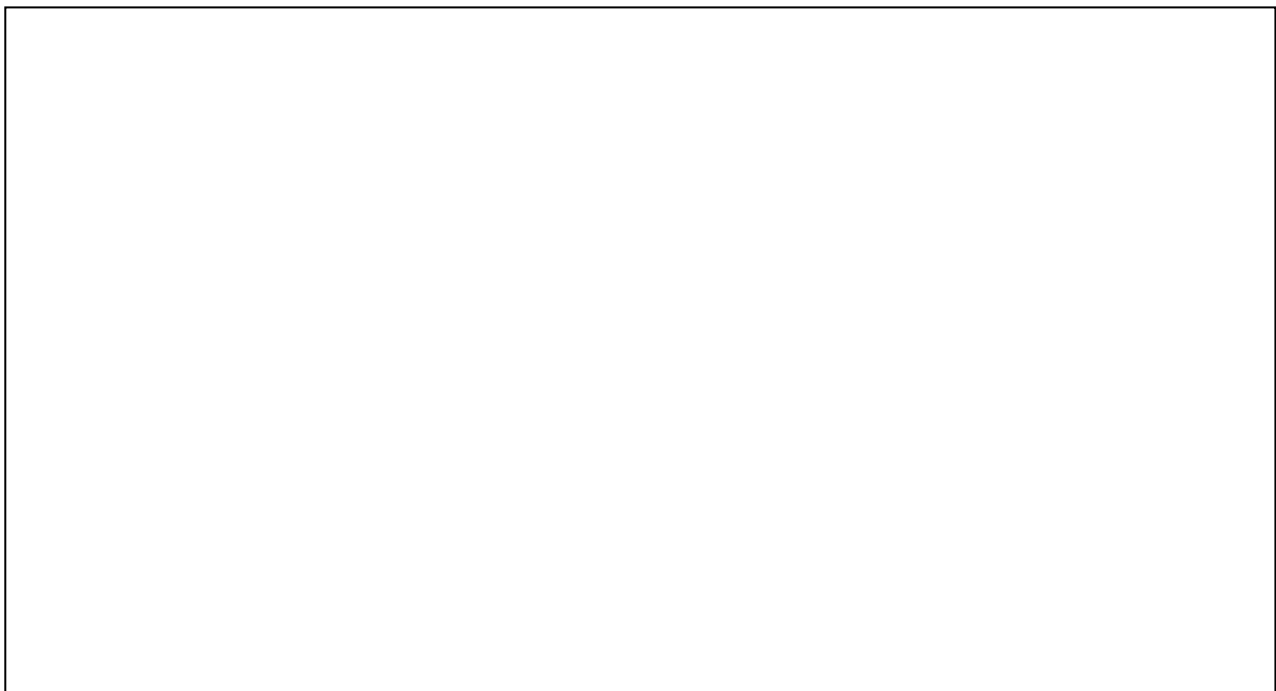
4. Рисунок 1 - Схема електрична принципова вимірювання фазного (лінійного) струму, фазної та лінійної напруги, активної потужності кола, реактивної потужності кола та коефіцієнту потужності кола у трифазному трипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка».

5. Таблиця 3 – Результати вимірювань (обчислень) електричних величин у трифазному трипровідному колі змінного струму

Електрична величина, її літерне позначення та одиниця вимірювання	фаза		
	$L1$	$L2$	$L3$
Фазний струм, I_{ϕ}, A			
Лінійний струм, I_L, A			
Фазна напруга, U_{ϕ}, B			
Лінійна напруга, U_L, B			
Активна потужність фази, P_{ϕ}, Bm			
Реактивна потужність кола, $Q_{\text{кола}}, Var$			
Активна потужність кола, $P_{\text{кола}}, Bm$			
Коефіцієнт потужності кола, $\cos \varphi_{\text{кола}}$			

6. Таблиця 4 - Найменування методів вимірювання електричних величин у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним та несиметричним освітлювальним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка»

Найменування електричної величини	Найменування методу вимірювання при симетричному та несиметричному навантаженні й розрахункові формули
1. Фазний (лінійний) струм	
2. Фазна напруга	
3. Лінійна напруга	
4. Активна потужність кола	



7. Рисунок 2 - Схема електрична принципова вимірювання фазного (лінійного) струму, фазної та лінійної напруги та активної потужності кола у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним та несиметричним освітлювальним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка»

8. Таблиця 5 - Результати вимірювань та розрахунків

Характер навантаження	Показання приладів												
	U_{PV1}, B	U_{PV2}, B	U_{PV3}, B	U_{PV4}, B	U_{PV5}, B	U_{PV6}, B	I_{PA1}, A	I_{PA2}, A	I_{PA3}, A	P_{PW1}, Bm	P_{PW2}, Bm	P_{PW3}, Bm	$P_{\text{кода}}, Bm$
симетричний													
несиметричний													



9. Рисунок 3 - Схема принципова електрична вимірювання реактивної потужності у трифазному чотирипровідному колі змінного струму з симетричним навантаженням, яке з'єднане за схемою «зірка», якщо струм навантаження більший, ніж границя вимірювання за струмом приладу

10. Розрахункова формула визначення реактивної потужності у трифазному чотирипровідному колі змінного струму, якщо струм навантаження більший, ніж границя вимірювання за струмом приладів

$$Q_{\text{кола}} =$$

11. Узагальнений висновок щодо практичної значущості методів вимірювання електричних величин у трифазних колах змінного струму.

Лабораторна робота
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ
ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ
ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Мета роботи:

Практичне застосування набутих навичок при проведенні вимірювань електричних величин цифровими вимірювальними приладами.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Ознайомитись з:

- означеннями: цифрові вимірювальні прилади; аналого-цифрові перетворювачі; цифро-аналогові перетворювачі;
- з основними функціональними вузлами цифрових вимірювальних приладів;
- перевагами цифрових вимірювальних приладів;
- видами цифрових вимірювальних приладів [1, с.131-144, 2, с. 240- 298, 3, с.216–263, 4, с.108 - 116].

Вміти розв'язувати практичні задачі:

1. Визначити відносну та абсолютну похибки показу $U = 60 \text{ В}$ цифрового вольтметра, клас точності якого 0,05/0,01, а границя вимірювання - 100 В.

2. Визначити відносну та абсолютну похибки показу $R = 8 \text{ кОм}$ цифрового омметра, клас точності якого 0,1/0,05, а границя вимірювання - 10 кОм.

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...8, рисунок 1 – Схема вимірювання електричних величин цифровими приладами;
- висновок щодо значущості цифрових приладів в процесах вимірювань електричних величин.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 4».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. На які різновиди, з точки зору функціонального призначення, поділяють цифрові засоби вимірювальної техніки?
2. Яке призначення цифрових засобів вимірювальної техніки?
3. Які основні переваги цифрових вимірювальних приладів?
4. Охарактеризуйте узагальнену структурну схему цифрового вимірювального приладу.
5. Що таке аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) та цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП)?
6. Що таке цифрові вимірювальні системи?
7. Назвіть основні метрологічні характеристики аналого-цифрових перетворювачів та цифрових приладів.
8. Охарактеризуйте основні елементи структурної схеми цифрового мультиметра.

1.3 Рекомендована література

1. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: конспект лекцій / Д.М.Нестерчук. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. – 256 с.
2. Кухарчук В.В. Основи метрології та електричних вимірювань: підручник / [В.В. Кухарчук, В.Ю. Кучерук, Є.Т.Володарський, В.В.Грабко] – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.
3. Поліщук Є.С. Метрологія та вимірювальна техніка: підручник / Є.С. Поліщук, М.М. Дорожовець, В.О. Яцук, В.М. Ванько, Т.Г. Бойко; за ред. проф. Є.С.Поліщука. – Львів: Видавництво Львівська політехніка, 2012. – 544 с.
4. Нестерчук Д.М. Контрольно-вимірювальні прилади з основами метрології: навчальний посібник для виконання лабораторних робіт / Д.М.Нестерчук,

С.О. Квітка, С.В. Галько. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2018. - 172 с.

2. Основні теоретичні відомості

З точки зору функціонального призначення, цифрові засоби вимірювальної техніки поділяють на: *аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП), цифрові вимірювальні прилади та цифрові вимірювальні системи.*

Залежно від виду вимірюваних величин ЦВП поділяються на: Залежно від виду вимірюваних величин ЦВП поділяються на: вольтметри постійного та змінного струму, амперметри змінного струму, вимірювачі частоти та інтервалу часу, омметри та мости постійного та змінного струму, комбіновані прилади – мультиметри, вимірювачі потужності, фазометри та спеціалізовані ЦВП, які призначені для вимірювання температури, витрати, швидкостей та механічних напружень.

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) – це вимірювальні прилади, в яких вимірювана величина автоматично в результаті квантування, дискретизації, порівняння та цифрового кодування і відповідних обчислень постає у цифровому коді. Це прилади, які застосовуються для вимірювань фізичних величин в промисловості, агропромисловому комплексі та наукових дослідженнях.

Переваги цифрових вимірювальних приладів: висока точність й швидкість, автоматизація процесу вимірювання, видача цифрового коду, що дає змогу застосувати їх у сучасних системах автоматичного керування.

Основними функціональними вузлами ЦВП є: вхідний аналоговий перетворювач (ВАП), аналого-цифровий перетворювач (АЦП), обчислювальний пристрій (ОП), цифровий відліковий пристрій (ЦВП) і пристрій управління (УП). На рисунку 2.1 наведена узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу. Вимірювана величина $x(t)$ спочатку перетворюється за допомогою ВАП в іншу величину $x'(t)$, зручну для подальшого аналого-цифрового перетворення. Наприклад, ВАП перетворює напругу або силу змінного струму в напругу постійного струму, електричний опір в напругу постійного струму, виконує

масштабне перетворення вхідного сигналу тощо. Аналого-цифровий перетворювач перетворює величину $x'(t)$, у відповідний їй цифровий код N_x , який або надходить безпосередньо на цифровий відліковий пристрій ЦВП, або піддається додатковому опрацюванню в обчислювальному пристрої (ОП). Зокрема, ОП може усереднювати результати декількох вимірювань для зменшення випадкової похибки, визначення параметрів сигналів, наприклад, частоти на основі інформації про період та інші сервісні функції. Цифровий відліковий пристрій містить дешифратор для перетворення вихідного цифрового коду АЦП або ОП в десятковий цифровий код і табло індикації результату вимірювання. Вихідний цифровий код АЦП або ОП може надійти також на цифровий реєструвальний пристрій або на вхід ЕОМ і використовуватись у системах керування об'єктами. Роботою всіх вузлів ЦВП керує пристрій управління ПУ.

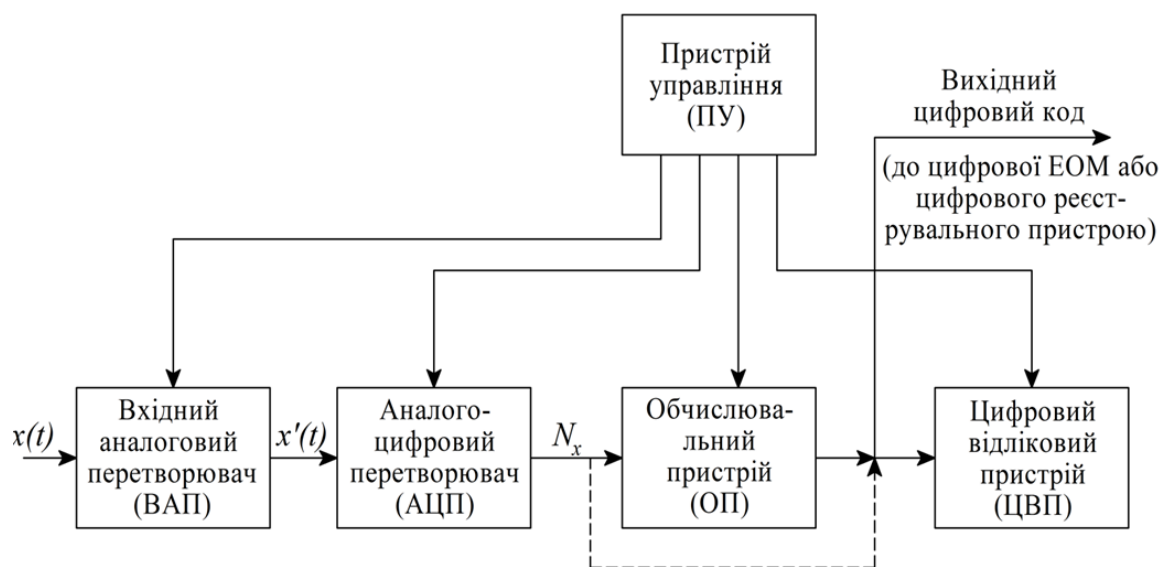


Рисунок 2.1 - Узагальнена структурна схема цифрового вимірювального приладу

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) – це вимірювальний перетворювач, який призначений для автоматичного перетворення неперервної вимірюваної величини аналогового сигналу в пропорційну їй дискретну величину, яка зображена цифровим кодом. Під час такого перетворення здійснюється дискретизація та квантування вхідного сигналу й цифрове кодування вимірювальної інформації. *Дискретизація сигналу* – це заміна неперервної у часі величини її

окремими вибірками, взятими в певні моменти часу. Суть квантування полягає у заміні неперервних значень сигналу в області його інтенсивності (рівня) квантованими (дозволеними) значеннями. Квантований номер, що відповідає вибірці вхідної величини у певний момент часу, зображується певним кодом і подається цифровим сигналом, який подається лише двома різними рівнями. Загалом АЦП не мають відлікових і (або) реєструвальних пристроїв і є базовою частиною складніших цифрових приладів або вимірювально-обчислювальних систем.

Як зазначено вище, під час аналого-цифрового перетворення виконується операція дискретизації вимірюваної величини в часі, при цьому в дискретизованому сигналі немає проміжних значень вхідного сигналу між мітками часу t_i та t_{i+1} , тому то може втрачатися вимірювальна інформація про проміжні значення сигналу, як наслідок, виникає похибка від дискретизації. Часовий інтервал за сталим часом між почерговими вимірюваннями сигналу під час дискретизації має назву *періодом дискретизації сигналу*.

Кодування результату аналого-цифрового перетворення – це операція його подання за допомогою сукупності (кодових) символів вибраного алфавіту (системи числення), що здійснюється за однозначними правилами. Використовується числове кодування і для цифрових вимірювань - це є операція переведення числового значення заданої величини N_x в іншу систему числення, а результати подаються бінарними символами, тобто лише двома різними рівнями.

Безпосереднє кодування результатів аналого-цифрового перетворення, крім застосування у вимірювальній техніці, використовується також у пристроях відображення результатів, а також з метою отримання певного рівня завадостійкості під час передавання результатів каналами зв'язку. Кожен закодований результат зображають певною кількістю кодових символів або кодовою комбінацією, яка відповідає правилам вибраного коду.

Цифровий код – це сукупність правил, які встановлюють значення кожного елемента залежно від його місця у кодовій комбінації та її довжини. В таблиці 2.1 наведені цифрові коди, які найчастіше використовують в вимірювальній техніці.

Таблиця 2.1 - Цифрові символи первинних цифрових кодів загального використання

Десяткове число	Одиничний нормальний код	Одиничний позиційний код	Двійковий нормальний код	Двійково-десятковий код
0	1	0000000000	00000	0000 0001
1	11	0000000001	00001	0000 0010
2	111	0000000010	00010	0000 0011
3	1111	0000000100	00011	0000 0100
4	11111	0000001000	00100	0000 0101
5	111111	0000010000	00101	0000 0110
6	1111111	0000100000	00110	0000 0111
7	11111111	0001000000	00111	0000 1000
8	111111111	0010000000	01000	0000 1001
9	1111111111	0100000000	01001	0000 1010
10	11111111111	1000000000	01010	0001 0000

Розглянемо кожний цифровий код більш детально:

- *одиничний нормальний (число-імпульсний) код* – значення числа подається кількістю імпульсів;

- *одиничний позиційний код* – значення числа відображається положенням одиниці серед нулів;

- *десятковий код* (основою є число 10) – значення числа подається у десятковій системі числення цифрами від 0 до 9 з вагами, пропорційними до 10 у відповідному степені, наприклад $654 = 6 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0$;

- *двійковий нормальний код* (основою є число 2) – значення числа записують у двійковій системі числення послідовністю n двійкових цифр $a_{n-1} a_{n-2} \dots a_2 a_1 a_0$, кожна з яких може мати лише значення $a_i = 0$ та 1, наприклад, 10011101. Вага цифри у числі дорівнює числу 2 у степені, яка визначається номером розряду

$$N_x = a_{n-1}2^{n-1} + a_{n-2}2^{n-2} + \dots + a_22^2 + a_12^1 + a_02^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i 2^i. \quad (1)$$

Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) – це вимірювальний перетворювач, який призначений для перетворення цифрового коду в аналогову величину.

Принцип перетворення міститься в підсумовуванні усіх розрядних струмів (напруг), які зважені за двійковим законом та пропорційних значенню опорної напруги. При цьому підсумовуються тільки струми тих розрядів, значення яких дорівнюють логічній 1. У двійковому коді вага від розряду до розряду змінюється удвічі. ЦАП класифікуються за:

- видом вихідного сигналу: з струмовим виходом та виходом у вигляді напруги;
- за типом цифрового інтерфейсу: з послідовним вводом та паралельним вводом вхідного коду;
- за кількістю ЦАП на кристалі: одноканальні та багатоканальні;
- за швидкодією.

Стандартним засобом для перетворення цифрового коду в аналогову величину є сітка із прецизійних резисторів, яка підключена до джерела опорної напруги. Перемикання резисторів здійснюється електронними ключами, керованими цифровим кодом N_x . Для прикладу розглянемо ЦАП з ланцюговою сіткою R-2R резисторів, який призначений для перетворення m-розрядного цифрового коду N_x у напругу $N_{вих}$ – рисунок 2.2. У кожній вузловій точці від 1 до m опори між певною точкою та спільними шинами в усіх трьох напрямках дорівнюють $2R$, тому потенціал i -тої точки ($i=1, 2, \dots m$) при увімкненні одного i -того перемикача S_i в положенні «1» дорівнює

$$U_i = \frac{U \cdot R}{2 \cdot R + \frac{4 \cdot R \cdot R}{2 \cdot R + 2 \cdot R}} = \frac{1}{3} \cdot U_0, \quad (2)$$

де U_0 – напруга джерела опорної напруги.

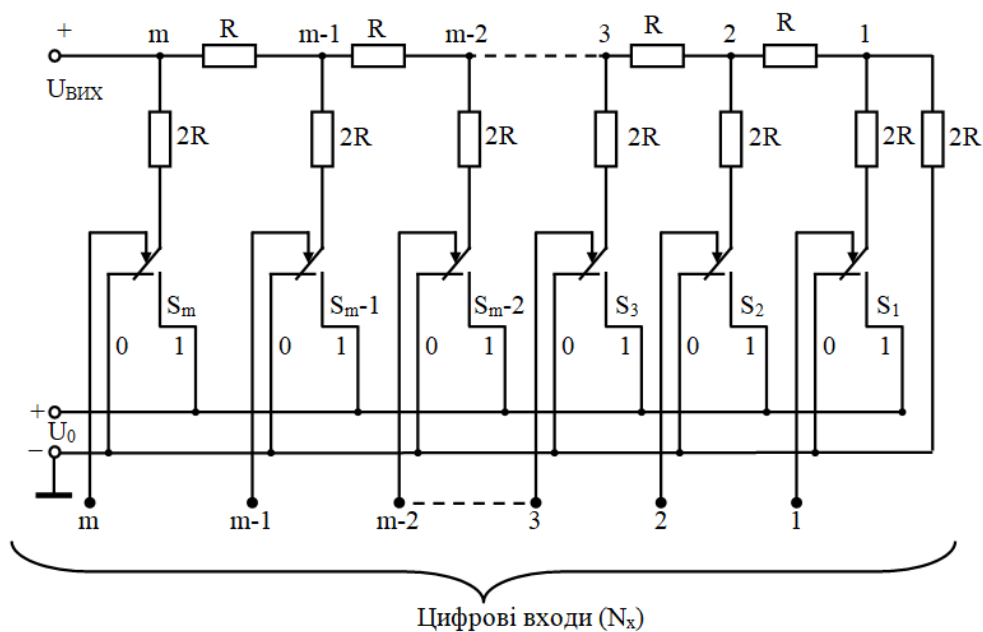


Рисунок 2.2 – Схема ЦАП з ланцюговою сіткою R-2R резисторів

При перемиканні m -го ключа S_m у положення «1» (при надходженні на цифровий вхід надійде сигнал «1» двійкового коду N_x) напруга $U_{вих}$ на виході ЦАП (див. рисунок 2.3) дорівнюватиме

$$U_{вих} = \frac{1}{3} \cdot U_0. \quad (3)$$

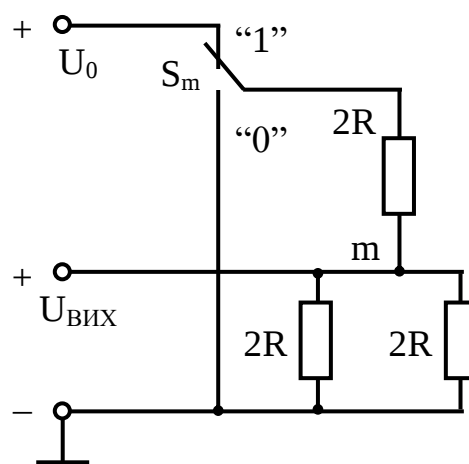


Рисунок 2.3 - Схема ЦАП з ланцюговою сіткою R-2R резисторів при перемиканні m -го ключа S_m у положення «1»

При увімкненні кожного наступного ключа S_i напруга на виході ЦАП порівняно з потенціалом точки m буде зменшена в 2^{m-1} разів, а саме

$$U_{вих(i)} = \frac{1}{3} \cdot U_0 \cdot \frac{2^i}{2^m}, \quad (4)$$

де m – кількість двійкових розрядів ЦАП;

i – порядковий номер цифрового входу ЦАП, на який надходить сигнал «1» двійкового коду N_X .

Вхідна напруга ЦАП визначається за формулою

$$U_{вих} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_0}{2^m} \cdot \sum_{i=1}^m 2^i \cdot a_i, \quad (5)$$

де a_i – вагові коефіцієнти, при цьому $a_i = 0$, якщо ключ знаходиться в положенні «0», $a_i = 1$, якщо ключ знаходиться в положенні «1».

Приклад. Визначити вихідну напругу ЦАП, якщо на його вхід надійшов двійковий кодовий сигнал $N_X = 101011$.

Оскільки на 1-му, 3-му, 5-му та 6-му входах «1», а на 2-му і 4-му – «0», то $a_1=a_3=a_5=a_6=1$ й $a_2 = a_4 = 0$. Отже, за формулою (4)

$$U_{вих} = \frac{1}{3} \cdot \frac{U_0}{2^6} \cdot (1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^6) = \frac{1}{3} \cdot \frac{86}{106} \cdot U_0 \approx 0,27 \cdot U_0.$$

Абсолютне значення мінімального кроку зміни вихідної напруги визначається як максимальним значенням 2^{m-1} вхідного коду, так і максимальним значенням вихідної напруги ЦАП. Серед динамічних параметрів ЦАП істотним є час встановлення вихідного сигналу, $t_{вст}$, і максимальна частота перетворень, $f_{пер}$. Час $t_{вст}$ визначається як інтервал часу від надходження вхідного коду N_X до входження вихідного сигналу у межі зони похибки навколо необхідного рівня аналогового сигналу. Максимальна частота перетворень $f_{пер}$, яка визначає швидкість ЦАП – це найбільша частота надходження вхідного коду, при якому параметри ЦАП відповідають заданим значенням.

Цифровими вимірювальними системами (ЦВС) є сукупність вимірювальних каналів, вимірювальних пристроїв та інших технічних засобів, об'єднаних для створення та аналізу сигналів цифрової вимірювальної інформації про декілька одно- чи різнорідних вимірюваних величин та інших видів інформації.

Нормованими метрологічними характеристиками для ЦВП є: кількість розрядів і значення одиниці найменшого розряду, які використовуються для оцінювання результатів вимірювань та встановлення параметрів якості виконаних вимірювань. Основною метрологічною характеристикою цифрових вимірювальних приладів є *значення одиниці найменшого розряду* – це розмір одного кванта q цифрового засобу вимірювань, що відповідає різниці між двома сусідніми станами цифрового вихідного значення.

Показ для цифрових приладів визначається співвідношенням

$$x = N_x \cdot q, \quad (6)$$

де N_x – кількість кроків квантування (квантів) з розміром q , який відповідає одиниці молодшого розряду цифрового засобу вимірювань.

Стала цифрового засобу вимірювань збігається з ціною поділки і дорівнює розміру кроку квантування q

$$C = C_{\text{нод}} = q. \quad (7)$$

Для цифрових приладів клас точності на шкалі позначається записом, наприклад, 0,02/0,01. В технічній документації це позначення класу точності у вигляді c/d , яке дорівнює 0,02/0,01. Форма похибки – відносна, яка визначається за виразом

$$\delta = \pm [c + d \times \left(\left| \frac{X_K}{x_{\text{вим}}} \right| - 1 \right)] \cdot 100\%. \quad (8)$$

Клас точності, в загальному вигляді, записується через косу риску з двома літерами c/d : літера d – клас точності при нульовому значенні $x = 0$, літера c – клас точності при кінцевому значенні $x = X_K$.

Граничне значення абсолютної похибки для ЦВП дорівнює

$$\Delta_{\text{гр}} = \pm \frac{d \cdot X_K + (c - d) \cdot x_{\text{вим}}}{100\%}. \quad (9)$$

На рисунку 2.4 наведена структурна схема цифрового мультиметра, який призначений для вимірювання напруги постійного струму $U_{\text{=}}$, постійного струму

$I_≈$, напруги змінного струму $U_≈$, змінного струму $I_≈$, опору R та інших фізичних величин X , перетворених на напругу постійного струму.

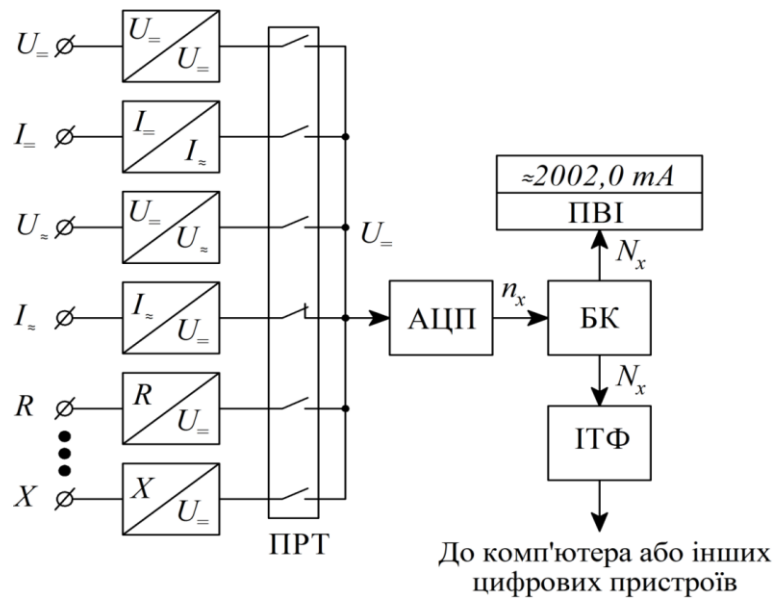


Рисунок 2.4 - Структурна схема цифрового мультиметра

Вимірювані величини під'єднуються до окремих входів мультиметра $U_≈$, $I_≈$, $U_≈$, $I_≈$, R , ..., X , а рід вимірюваної величини, а також її піддіапазон вимірювання вибирають за допомогою перемикача ПРП. Кожну з вимірюваних величин або масштабний перетворювач $U_≈/U_≈$, або перетворювачі роду фізичної величини $U_≈/U_≈$, $I_≈/U_≈$, $I_≈/U_≈$, $R/U_≈$, ..., $X/U_≈$ перетворюють на уніфікований сигнал напруги $U_≈$ постійного струму, яку, своєю чергою, за допомогою АЦП перетворюють на кодовий сигнал n_x і подають до блока керування БК.

3. Порядок виконання роботи

1. Записати метрологічні характеристики цифрових приладів та електронного лічильника, що використовуються в роботі в таблицях 1...5 звіту до лабораторної роботи.

2. Зібрати електричне коло вимірювання електричних величин цифровими приладами за схемою, що наведена на рисунку 1 звіту до лабораторної роботи.

3. Здійснити вимірювання цифровими приладами величин сили струму, напруги, активної потужності та активної енергії у однофазному колі змінного струму при різних струмових навантаженнях. Результати вимірювань навести в таблиці 6 звіту до лабораторної роботи.

4. Здійснити цифровим мультиметром вимірювання величин активного опору та температури об'єкту, а також сили струму, напруги та ємності споживача у однофазному колі змінного струму при різних струмових навантаженнях. Результати вимірювань навести в таблиці 7 звіту до лабораторної роботи.

5. Сформулювати висновок стосовно значущості цифрових приладів в процесах вимірювань електричних величин.

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.
2. Таблиця 1 - Основні метрологічні характеристики електронного лічильника

Найменування характеристики	Величина
Тип	
Номинальний струм, I_{HL}, A	
Максимальний струм, $I_{L,max}, A$	
Номинальна напруга, U_{HL}, B	
Номинальна частота, $f_H, Гц$	
Номинальне передаточне число, $A_H, \text{имп/кВт}\cdot\text{год}$	
Номинальна стала, $C_H, \text{Вт}\cdot\text{год/имп}$	
Клас точності	

3. Таблиця 2 – Метрологічні характеристики цифрового амперметра

Найменування характеристики	Величина
Тип	
Призначення	
Діапазон вимірювання струму, A	
Напруга живлення, B	
Похибка вимірювання струму, %	
Діапазон робочих температур, $^{\circ}C$	
Ступінь захисту приладу	
Потужність, що споживається приладом, Bt	
Максимальний струм перевантаження, A	

4. Таблиця 3 – Метрологічні характеристики цифрового вольтметра

Найменування характеристики	Величина
Тип	
Призначення	
Діапазон вимірювання напруги, V	
Дискретність індикації, V	
Похибка вимірювання напруги, %	
Діапазон робочих температур, $^{\circ}C$	
Потужність, що споживається приладом, W	
Габаритні розміри, mm	

5. Таблиця 4 – Метрологічні характеристики цифрового ватметра

Найменування характеристики	Величина
Тип	
Призначення	
Діапазон вимірювання потужності, W	
Напруга живлення, V	
Похибка вимірювання потужності, %	
Діапазон робочих температур, $^{\circ}C$	
Ступінь захисту приладу	
Потужність, що споживається приладом, W	
Кількість розрядів індикатора	

6. Таблиця 5 – Метрологічні характеристики цифрового мультиметра

Найменування характеристики	Величина
Тип	
Призначення	
Діапазон вимірювання величин: - напруги, V - сили струму, A - активного опору, Ω - ємності, μF - температури, $^{\circ}C$	
Діапазон робочих температур, $^{\circ}C$	
Діапазон точності процесів вимірювання величин: - напруги, V - сили струму, A - активного опору, Ω - ємності, μF - температури, $^{\circ}C$	
Швидкість вимірювання, s	
Габаритні розміри, mm	

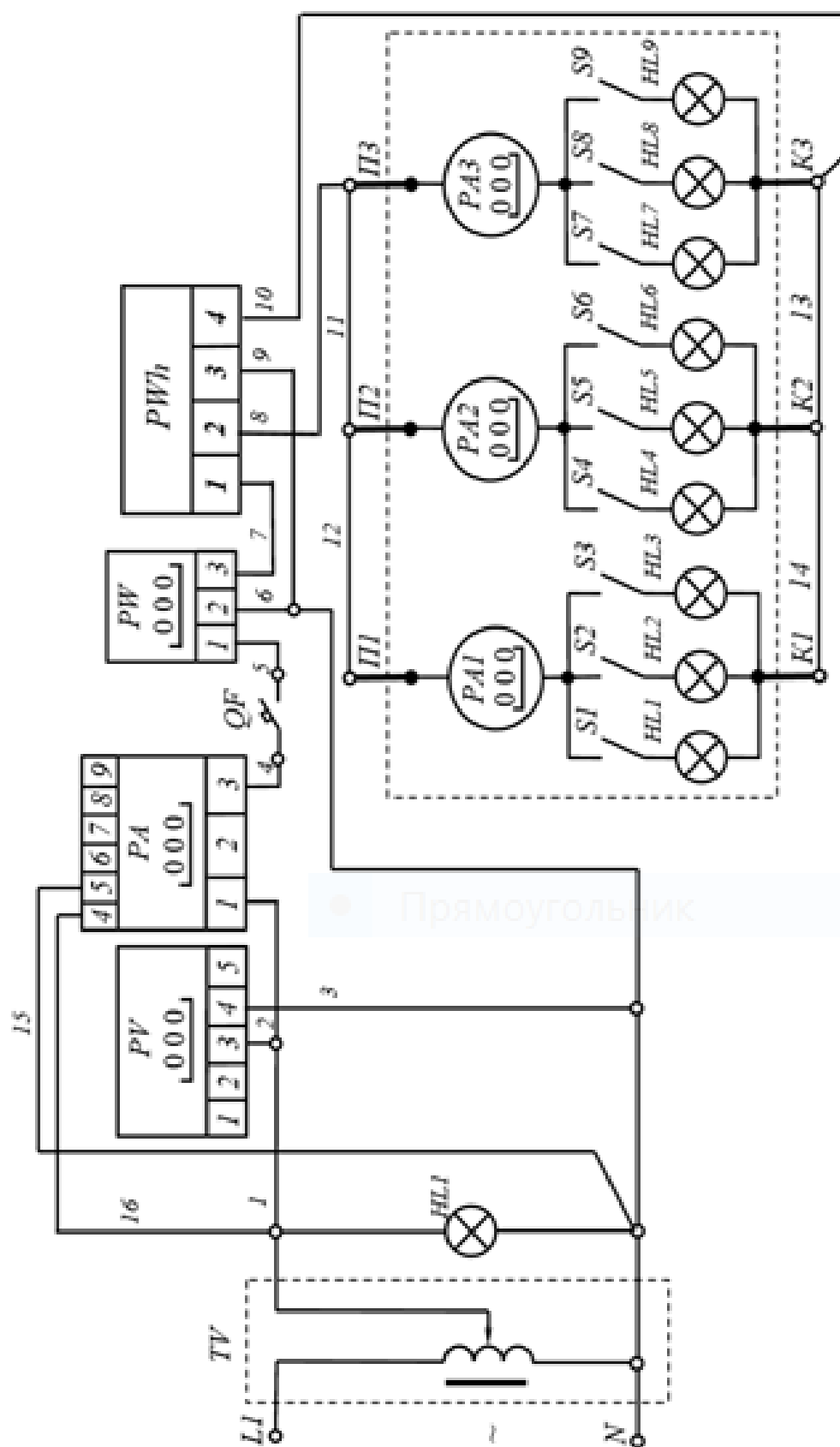


Рисунок 1 - Схема вимірювання електричних величин цифровими приладами

Примітка до рисунку 1: *TV* – лабораторний автотрансформатор; *PA* – цифровий амперметр; *PWh* – електронний лічильник; *PV* – цифровий вольтметр; *PA1...PA3* – цифрові амперметри; *PW* – цифровий ватметр; *S1...S9* - тумблери; *1...16* - з'єднувальні проводи; *HL1...HL9* – освітлювальне навантаження; *П1...П3* – затискачі «початки секцій навантаження»; *K1...K3* – затискачі «кінці секцій навантаження».

8. Таблиця 6 – Результати вимірювань

Величина	Показання цифрових приладів						
	<i>PV</i>	<i>PA</i>	<i>PA1</i>	<i>PA2</i>	<i>PA3</i>	<i>PW</i>	<i>PWh</i>
1 Сила струму, <i>A</i>	-					-	-
2 Напруга, <i>B</i>		-	-	-	-	-	-
3 Активна потужність, <i>Bm</i>	-	-	-	-	-		-
4 Активна електроенергія, <i>кВт·год</i>	-	-	-	-	-	-	

9. Таблиця 8 – Результати вимірювань

Величина	Показання цифрового мультиметра				
	№ досліду				
	1	2	3	4	5
1 Активний опір, <i>Om</i>					
2 Температура, <i>°C</i>					
3 Сила струму, <i>A</i>					
4 Напруга, <i>B</i>					
5 Ємність, <i>мкФ</i>					

10. Висновок щодо значущості цифрових приладів в процесах вимірювань електричних величин.

Лабораторна робота
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА ПАСПОРТНИМИ ДАНИМИ

Мета роботи:

Практичне застосування набутих навичок при проведенні досліджень енергетичних параметрів силового трансформатора за паспортними даними.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- аналітичні вирази для визначення енергетичних параметрів силового трансформатора за паспортними даними.

Ознайомитись з:

- паспортними даними силових трансформаторів [1, 17-22, 2, с.22-39];
- методикою дослідження енергетичних параметрів силового трансформатора за паспортними даними [1, 17-22, 2, с.22-39, с.58-62, 3, с.156-198, 4, с.117-137];

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...3;
- висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 5»

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Поясніть означення трансформатора та силового трансформатора? Які вам відомі види силових трансформаторів?

2. Поясніть означення номінального режиму роботи силового трансформатора.

3. Які величини належать до основних паспортних даних силових трансформаторів?

4. Наведіть аналітичні вирази для розрахунку енергетичних параметрів за паспортними даними силового трансформатора: номінальних струмів первинної і вторинної обмоток, номінального ККД; активної і реактивної потужності, споживані трансформатором при заданому коефіцієнті потужності; сумарних втрат в трансформаторі.

5. Поясніть який режим є режимом холостого ходу (х.х.) силового трансформатора.

6. Поясніть який режим є режимом короткого замикання силового трансформатора.

7. Поясніть, на що витрачається активна і реактивна потужності, які споживаються трансформатором з мережі на х.х.

8. Поясніть, чому коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу є важливим енергетичним параметром силового трансформатора?

1.3 Рекомендована література

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.

2. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.

3. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф., Смуригин В. М., Ковальов О. В., Вужицький А. В. Електричні машини і апарати: навчальний посібник. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

4. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Електричні машини: підручник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

2. Основні теоретичні відомості

Трансформатор – це статичний електромагнітний пристрій, який призначений для перетворення змінних напруги та струму за величиною без зміни їхньої частоти. Трансформатор має назву силовий, якщо він застосовується для

перетворення електричної енергії в електричних мережах і в установках, призначених для приймання і використання електричної енергії.

Силові трансформатори поділяються за такими критеріями:

- за кількістю обмоток – двохобмотувальні та триобмотувальні;
- за кількістю фаз – однофазні та трифазні;
- за призначенням – понижуючі та такі, що підвищують;
- за місцем установки – внутрішні та зовнішні;
- за групою з'єднання обмоток;
- за способом охолодження.

До силових належать трансформатори трифазні і багатофазні потужністю $6,3 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ і більше, однофазні потужністю $5 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ та більше. За менших потужностей трансформатори мають назву трансформатори малої потужності.

Номинальний режим роботи силового трансформатора – це режим, який відповідає номінальним паспортним даним трансформатора та який забезпечує високі енергетичні показники ($\cos\varphi$ та ККД) та заданий строк служби, при цьому струми в первинній та вторинній обмотках дорівнюють номінальним.

Основні паспортні дані силових трансформаторів зазначені у паспорті трансформатора. Це параметри, що забезпечують його роботу в умовах, встановлених нормативним документом, і які є підставою для визначення умов виготовлення, випробувань та експлуатації.

До основних паспортних даних силових трансформаторів належать: тип трансформатора, наприклад, ТМ-250/10; номінальна повна потужність, $S_n, \text{кВА}$; номінальна лінійна напруга обмотки вищої напруги, $U_{1n}, \text{кВ}$; номінальна лінійна напруга обмотки нижчої напруги, $U_{2n}, \text{кВ}$; номінальний лінійний струм обмотки вищої напруги (ВН), $I_{1n}, \text{А}$; номінальний лінійний струм обмотки нижчої напруги (НН), $I_{2n}, \text{А}$; номінальна частота, $f_n, \text{Гц}$; кількість фаз; схема та група з'єднання обмоток; напруга короткого замикання, $u_k, \%$; потужність втрат холостого ходу, $P_0, \text{Вт}$; потужність втрат короткого замикання, $P_k, \text{Вт}$; струм холостого ходу, $I_0, \%$; режим роботи; клас нагрівостійкості ізоляції; повна маса; завод-виготовлювач та рік випуску. Якщо в паспорті або на табличці з заводу, які прикріплена до

корпусу трансформатора, не приведені значення номінальних струмів, вони визначаються за виразами

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}}; \quad (1)$$

$$I_{2н} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{2н}}. \quad (2)$$

Номінальні потужності силових трансформаторів є стандартизованими та дорівнюють 6,3; 10; 16; 25; 40; 63; 100; 160; 250; 400; 630; 1000; 1600; 2500; 4000; 6300; 10000 $\kappa B \cdot A$.

Номінальні напруги є також стандартизованими, а саме:

- $U_{1н} = 6; 10; 20; 35; 100; 220; 330; 500; 750; 1150 \kappa B$;
- $U_{2н} = 0,23; 0,4; 0,69; 1,2; 3,15; 6,3; 10,5; 22; 38,5; 121; 165 \kappa B$.

Слід відзначити, що в паспорті трансформатора зазначається значення повної потужності, $S_n, \kappa B \cdot A$, яка характеризує ту потужність, яку трансформатор може віддавати споживачу, якщо останній буде працювати при $\cos \varphi_2 = 1,0$, тобто характер навантаження є активний. Тому то потужність силових трансформаторів не можливо визначати за величиною активної потужності, так як така потужність залежить від характеру навантаження, тобто від коефіцієнта потужності споживача, який невідомий на стадії проектування та виробництва силових трансформаторів.

Аналітичні вирази для розрахунку за паспортними даними силового трансформатора:

- номінальних струмів первинної і вторинної обмоток за виразами (1) та (2)
- номінального ККД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{m_2 \cdot U_{2н} \cdot I_{2н} \cdot \cos \varphi_2}{m_1 \cdot U_{1н} \cdot I_{1н} \cdot \cos \varphi_1}; \quad (3)$$

- активної і реактивної потужності, споживані трансформатором при заданому коефіцієнті потужності, відповідно

$$P_{1H} = S_H \cdot \cos \varphi_H; \quad (4)$$

$$Q_{1H} = S_H \cdot \sin \varphi_H; \quad (5)$$

- сумарних втрат в силовому трансформаторі

$$\sum p = P_0 + P_{к.н}. \quad (6)$$

Режим холостого ходу (х.х.) силового трансформатора – це режим, при якому первинна обмотка трансформатора підключена до мережі живлення змінного струму з номінальною напругою та частотою, й по обмотці проходить струм, а вторинна обмотка розімкнена й струм навантаження дорівнює нулю. Це режим, який визначає властивості трансформатора, як електромагнітного перетворювача енергії.

Режим короткого замикання силового трансформатора – це режим, при якому до первинної обмотки підведена напруга, а вторинна обмотка замкнена накоротко. Розрізняють два режими короткого замикання: аварійний і штучний (дослідний). Аварійне коротке замикання проходить в експлуатаційних умовах у трансформаторі, що підключений до номінальної первинної напруги. В обмотках трансформатора проходять струми, які в багато разів (в 7-20 раз) перевищують номінальний і можуть пошкодити трансформатор. Випробувальний режим короткого замикання створюють штучно і проводять при пониженій первинній напрузі, значення якої підбирається таким, щоб по обмотках трансформатора, проходив струм короткого замикання, який дорівнює номінальному струму. Така напруга має назву напруга короткого замикання, $U_{кл}$, визначається у відносних одиницях або у відсотках від номінального значення напруги первинної обмотки.

В режимі холостого ходу трансформатор споживає з мережі змінного струму, як активну потужність, P_0 , так й реактивну потужність, Q_0 . При цьому реактивна потужність витрачається на створення основного магнітного потоку та потоків розсіювання обмоток трансформатора. Активна потужність витрачається на електричні втрати на активному опорі первинної обмотки та на магнітні втрати на гістерезис й вихрові струми в магнітопроводі. Значення потужності

холостого ходу та струму холостого ходу наведені в паспорті силових трансформаторів. Коефіцієнт потужності в режимі холостого ходу, $\cos\varphi_0$, визначається за виразом

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1н} \cdot I_0}. \quad (7)$$

Так як активна складова струму холостого ходу, I_{0a} , набагато менша, ніж реактивна складова струму холостого ходу, а кут зсуву фаз, φ_0 , струму I_0 відносно напруги живлення приблизно дорівнює 90° , тому $\cos\varphi_0$ в режимі холостого ходу є малим, а саме, $\cos\varphi_0 = 0,1 \dots 0,2$. Це свідчить про те, що в режимі холостого ходу трансформатор споживає з мережі значну реактивну потужність при ККД, який дорівнює нулю. Тому на практиці необхідно не допускати тривалу роботу трансформатора в режимі холостого ходу з низьким коефіцієнтом потужності.

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці Б.1, що наведена в додатку Б, записати паспортні дані заданого силового трансформатора в таблицю 1.

2. Визначити розрахунковим методом:

- номінальний струм в обмотці ВН, $I_{1н}$, А, та номінальний струм в обмотці НН, $I_{2н}$, А, силового трансформатора;
- значення активної потужності, $P_{1н}$, кВт, та реактивної потужності, $Q_{1н}$, кВАр, що споживається трансформатором з мережі живлення при номінальному навантаженні й коефіцієнті потужності $\cos\varphi_n = 0,8$;
- силу струму холостого ходу, I_0 , А, та напругу короткого замикання, $U_{кл}$, В, силового трансформатора;
- значення коефіцієнта потужності в режимі холостого ходу, $\cos\varphi_0$, в.о., та коефіцієнта потужності в режимі короткого замикання, $\cos\varphi_k$, в.о.;
- значення активної, $u_{ка}$, в.о., та реактивної, $u_{кр}$, в.о., складових напруг короткого замикання силового трансформатора;
- значення активної, $U_{ка}$, В, та реактивної, $U_{кр}$, В, складових напруг короткого замикання силового трансформатора;

- сумарні втрати в силовому трансформаторі при номінальному навантаженні,
 $\sum p, Bm.$

3. Результати розрахунків навести в таблиці 2 звіту до лабораторної роботи.

4. За даними таблиці Б.2, що наведена в додатку Б до лабораторної роботи, визначити значення магнітної індукції, B_c , $Tл$, в стрижнях силових трансформаторів за заданою величиною силового трансформатора. Результати навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи.

5. Визначити розрахунковим методом:

- величину основного магнітного потоку, Φ_m , $Bб$;
- число витків обмоток ВН та НН, w_1 та w_2 , відповідно, силового трансформатора при $E_{1н.ф} \cong U_{1н.ф}$ та $E_{2н.ф} \cong U_{2н.ф}$;
- коефіцієнт трансформації силового трансформатора, k .

6. Результати навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи.

7. Сформулювати висновок щодо отриманих результатів та провести їх детальний аналіз

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Паспортні дані силового трансформатора

Номер варіанту	Тип силового трансформа- тора	S_n , kVA	На- пруга обмо- тки ВН $U_{1н}, kV$	На- пруга обмо- тки НН $U_{2н}, kV$	Схема та група з'єд- нання	Втрати, Bm		$u_k\%$, %	$i_0\%$, %	d , м
						P_o	$P_{к.н}$			

3. Таблиця 2 – Результати розрахунків

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Номінальний струм в обмотці ВН	I_{1H}, A	$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}}$	$I_{1H} =$
Номінальний струм в обмотці НН	I_{2H}, A	$I_{2H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2H}}$	$I_{2H} =$
Активна потужність	$P_{1H}, кВт$	$P_{1H} = S_H \cdot \cos \varphi_H$	$P_{1H} =$
Реактивна потужність,	$Q_{1H}, кВАр$	$Q_{1H} = S_H \cdot \sin \varphi_H$	$Q_{1H} =$
Сила струму холостого ходу	I_0, A	$I_0 = \frac{i_{0\%} \cdot I_{1H}}{100}$	$I_0 =$
Напруга короткого замикання	$U_{кл}, B$	$U_{кл} = \frac{u_{кн\%} \cdot U_{1H}}{100}$	$U_{кл} =$
Коефіцієнт потужності в режимі х.х.	$\cos \varphi_0, в.о.$	$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_0}$	$\cos \varphi_0 =$
Коефіцієнт потужності в режимі к.з.	$\cos \varphi_k, в.о.$	$\cos \varphi_k = \frac{P_{к.н}}{\sqrt{3} \cdot U_{к.л} \cdot I_{1H}}$	$\cos \varphi_k =$
Активна складова напруги короткого замикання	$u_{ка}, в.о.$	$u_{ка\%} = u_{к\%} \cdot \cos \varphi_k$	$u_{ка} =$
Активна складова напруги короткого замикання (в іменованих одиницях)	$U_{ка}, B$	$U_{ка} = \frac{u_{ка\%} \cdot U_{1H}}{100}$	$U_{ка} =$
Реактивна складова напруги короткого замикання	$u_{кр}, в.о.$	$u_{кр\%} = u_{к\%} \cdot \sin \varphi_k$	$u_{кр} =$
Реактивна складова напруги короткого замикання (в іменованих одиницях)	$U_{кр}, B$	$U_{кр} = \frac{u_{кр\%} \cdot U_{1H}}{100}$	$U_{кр} =$
Сумарні втрати при номінальному навантаженні	$\sum p, Вт$	$\sum p = P_0 + P_{к.н}$	$\sum p =$

4. Таблиця 3 – Результати розрахунків

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Магнітна індукція в стрижнях силових трансформаторів	$B_c, \text{Тл}$	за даними таблиці Б.2 додатку Б	$B_c =$
Основний магнітний потік	$\Phi_m, \text{Вб}$	$\Phi_m = B_c \cdot \Pi_c$	$\Phi_m =$
Площа перерізу стрижня магнітопроводу	$\Pi_c, \text{м}^2$	$\Pi_c = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 0,92$	$\Pi_c =$
Число витків обмоток ВН	$W_1, \text{витків}$	$W_1 = \frac{E_{1\phi}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m}$	$W_1 =$
Число витків обмоток НН	$W_2, \text{витків}$	$W_2 = \frac{E_{2\phi}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \Phi_m}$	$W_2 =$
Коефіцієнт трансформації силового трансформатора	$k, \text{в.о.}$	$k = \frac{W_1}{W_2}$	$k =$

5. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Лабораторна робота
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ВТРАТ
ТА ПОБУДОВИ ГРАФІКУ ККД СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи:

Практичне застосування методики розрахунку втрат та побудови графіку ККД силового трансформатора при різних коефіцієнтах потужності.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- причини виникнення магнітних та електричних втрат в силовому трансформаторі;
- аналітичні вирази для визначення сумарних втрат в трансформаторі при зміні коефіцієнту навантаження;
- аналітичні вирази для визначення коефіцієнта корисної дії при зміні коефіцієнту навантаження й при коефіцієнту потужності та за паспортними даними.

Ознайомитись з:

- паспортними даними силових трансформаторів [1, 17-22, 2, с.22-39];
- методикою розрахунку втрат силового трансформатора;
- методикою побудови графіку коефіцієнту корисної дії (ККД) при зміні коефіцієнту навантаження й при зміні коефіцієнту потужності за паспортними даними;
- умовою, при якій ККД силового трансформатора буде максимальним [1, с.58-62, 2, с.92-95, 3, с.156-198, 4, с.167-173];

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...3, рисунок 1 – Графічні залежності ККД силового трансформатора від коефіцієнту навантаження, $\eta = f(\beta)$, при $\cos\varphi_2=1$ та $\cos\varphi_2=0,8$; рисунок 2 -

Графічна залежність сумарних втрат в силовому трансформаторі при зміні навантаження.

- висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 6».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Що таке режим навантаження силового трансформатора?
2. Які види навантаження трансформатора вам відомі?
3. Як аналітично визначається коефіцієнт навантаження силового трансформатора?
4. Наведіть енергетичну діаграму перетворення активної потужності в силовому трансформаторі та охарактеризуйте її складові.
5. Наведіть енергетичну діаграму перетворення реактивної потужності силового трансформаторі та охарактеризуйте її складові.
6. Поясніть, яка потужність приймається за електричні втрати, а яка потужність приймається за магнітні втрати в силовому трансформаторі.
7. Охарактеризуйте постійні втрати потужності та змінні втрати потужності в силовому трансформаторі.
8. Як аналітично визначаються сумарні втрати в трансформаторі при зміні коефіцієнту навантаження?
9. Як аналітично визначити коефіцієнт корисної дії силового трансформатора при зміні коефіцієнту навантаження й при зміні коефіцієнту потужності за паспортними даними?
10. Охарактеризуйте умову, при якій ККД силового трансформатора буде максимальним.

1.3 Рекомендована література

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.
2. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.
3. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф., Смуригин В. М., Ковальов О. В., Вужицкий А. В. Електричні машини і апарати: навчальний посібник. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
4. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Електричні машини: підручник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

2. Основні теоретичні відомості

Режим навантаження силового трансформатора – це режим роботи, при якому первинна обмотка підключена до мережі живлення змінного струму з номінальною напругою та частотою, в вторинна обмотка замкнута на зовнішній опір навантаження та в ній проходить струм навантаження.

На практиці розрізняють види навантаження силових трансформаторів:

- режим номінального навантаження при струмах в первинній та вторинній обмотках дорівнюють номінальним, при якому $I_1 = I_{1н}$ та $I_2 = I_{2н}$;
- режим недовантаження, при якому $I_1 < I_{1н}$ та $I_2 < I_{2н}$;
- режим перевантаження, при якому $I_1 > I_{1н}$ та $I_2 > I_{2н}$.

Режим недовантаження трансформатора при коефіцієнті $\beta < 1$ належить за умовою нагріву до нормального режиму роботи, але основні енергетичні показники трансформатора в режимі недовантаження нижчі, ніж номінальні, тому тривала робота трансформатора є економічно недоцільною.

Режим перевантаження при $\beta > 1$ характеризується збільшенням струмів більш, ніж номінальні, тому виникає інтенсивний нагрів обмоток, значно скорочується строк служби ізоляції, збільшуються втрати потужності та знижуються енергетичні показники трансформатора.

Аналітично коефіцієнт навантаження силового трансформатора визначається за виразом

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}} = \frac{I_1}{I_{1H}}. \quad (1)$$

В процесі трансформування електричної енергії частина енергії витрачається в силовому трансформаторі на покриття втрат.

Енергетична діаграма перетворення активної потужності в силовому трансформаторі наведена на рисунку 2.1.

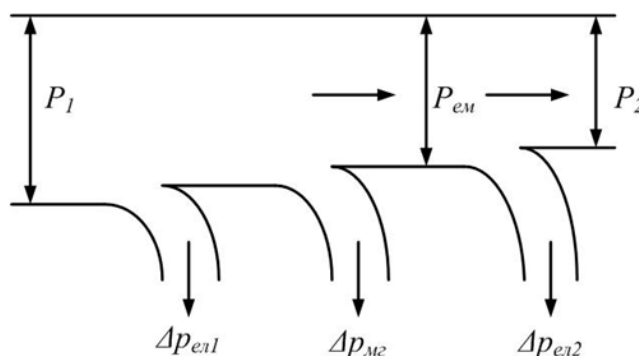


Рисунок 2.1 - Енергетична діаграма перетворення активної потужності в силовому трансформаторі,

де P_1 – активна потужність, яку споживає трансформатор з мережі живлення, $Вт$; P_{em} – електромагнітна потужність, яка передається електромагнітним шляхом з первинної обмотки до вторинної, $Вт$;

ΔP_{el1} – втрати активної потужності в первинних обмотках із-за теплової дії струмів, які протікають в обмотках, $Вт$;

$\Delta P_{mг}$ – магнітні втрати потужності в магнітопроводі трансформатора із-за теплової дії вихрових струмів і гістерезису, $Вт$;

ΔP_{el2} – втрати активної потужності у вторинних обмотках із-за теплової дії струмів, які протікають в обмотках, $Вт$;

P_2 – активна потужність, яка віддається трансформатором споживачу, $Вт$.

Активна потужність, яку споживає трансформатор з мережі живлення, дорівнює

$$P_1 = P_2 + \sum \Delta p = P_2 + \Delta P_{el1} + \Delta P_{el2} + \Delta P_{mг}. \quad (2)$$

Енергетична діаграма перетворення реактивної потужності в силовому трансформаторі наведена на рисунку 2.2.

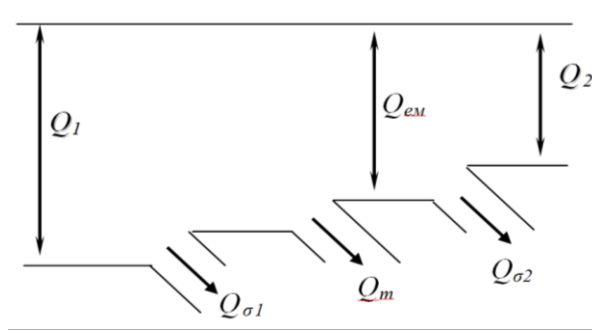


Рисунок 2.2 - Енергетична діаграма перетворення реактивної потужності в силовому трансформаторі,

де Q_1 – реактивна потужність, яка надходить до первинної обмотки трансформатора з мережі живлення, Var ;

$Q_{\sigma 1}$ – реактивна потужність для створення магнітного поля розсіювання первинної обмотки, Var ;

Q_m – реактивна потужність для створення магнітного поля взаємної індукції трансформатора та магнітного потоку Φ_m , Var ;

Q_{m2} – реактивна потужність, яка передається електромагнітним шляхом з первинної обмотки до вторинної, Var ;

$Q_{\sigma 2}$ – реактивна потужність для створення магнітного поля розсіювання вторинної обмотки, Var ;

Q_2 – реактивна потужність трансформатора, яка віддається їм до мережі живлення споживачів електроенергії, Var .

За потужність магнітних втрат приймається потужність холостого ходу трансформатора, P_0 , при $U_1=U_{1н}$, а за потужність електричних втрат приймається потужність короткого замикання, $P_{кн}$, при $I_1=I_{1н}$. Значення потужностей P_0 та $P_{кн}$ наведені в паспорті силового трансформатора.

При розгляді питання щодо втрат потужності в силових трансформаторах важливим є розподіл їх на постійні та змінні втрати. Магнітні втрати в сталі магнітопроводу пропорційні квадрату значення основного магнітного потоку, Φ_m , який при напрузі $U_1=const$ та при зміні навантаження від холостого ходу до номінального практично не змінюється, тому то магнітні втрати є постійними втратами.

Електричні втрати в обмотках пропорційні квадрату значення струмів в обмотках, тому то характеризуються як змінні втрати.

Сумарні втрати в силовому трансформаторі при зміні коефіцієнту навантаження визначаються за виразом

$$\sum p = P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}, \quad (3)$$

де β - коефіцієнт завантаження трансформатора.

На рисунку 2.3 наведений загальний вид графічних залежностей сумарних втрат в трансформаторі від коефіцієнту навантаження.

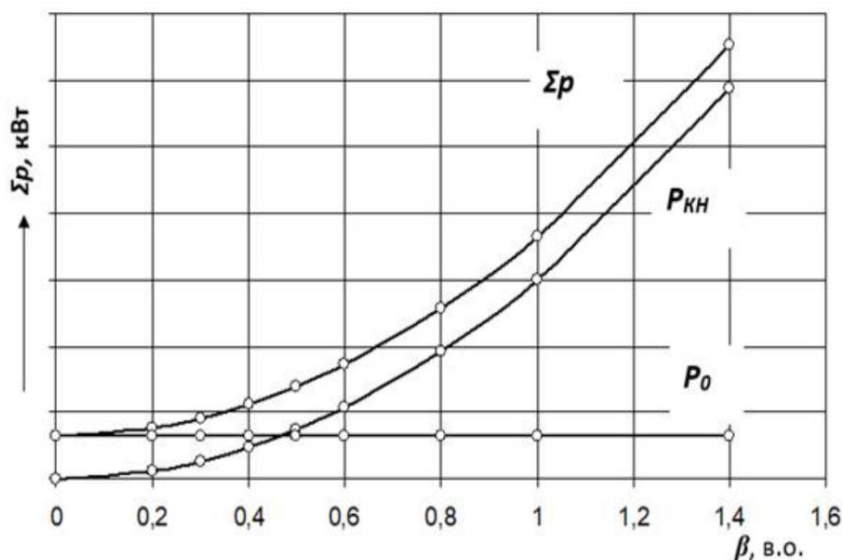


Рисунок 2.3 - Загальний вид графічних залежностей сумарних втрат в трансформаторі від коефіцієнту навантаження

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як відношення активної потужності на виході вторинної обмотки, P_2 , (корисна потужність), до активної потужності на вході первинної обмотки P_1 , (потужність, що споживається первинною обмоткою з мережі живлення) за виразом

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{(P_1 - \sum p)}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}. \quad (4)$$

Коефіцієнт корисної дії при зміні коефіцієнту навантаження й при зміні коефіцієнту потужності за паспортними даними визначається за формулою

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 \cdot P_{к.ном}}{\beta \cdot S_n \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 \cdot P_{к.ном}}. \quad (5)$$

Слід відзначити, що важливим показником режиму навантаження силових трансформаторів, як джерела електроенергії для споживачів, є характер навантаження споживачів, який визначається коефіцієнтом потужності навантаження, $\cos\varphi_2$. При цьому характер навантаження може бути:

- активний: $\cos\varphi_2 = 1$;
- активно-індуктивний: $\cos\varphi_2 > 0$;
- активно-ємнісний: $\cos\varphi_2 < 0$.

Аналіз виразу (5) показує, що ККД трансформатора залежить як від величини коефіцієнту завантаження, так й від характеру навантаження ($\cos\varphi_2$). При $\beta = 0$ потужність P_2 та ККД дорівнюють нулю. Зі збільшенням коефіцієнта потужності та активної потужності P_2 значення ККД трансформатора збільшується. Це пояснюється тим, що частка магнітних втрат зменшується в енергетичному балансі. При певному значенні коефіцієнта β_m ККД досягає максимуму, а при подальшому збільшенні навантаження ККД знижується. Причиною цього є значне збільшення електричних втрат при зростанні струмів в обмотках. При цьому електричні втрати пропорційні квадрату коефіцієнту навантаження, а активна потужність P_2 збільшується тільки при збільшенні коефіцієнту навантаження.

Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати дорівнюють електричним втратам, тому то коефіцієнт навантаження трансформатора, при якому ККД трансформатора є максимальним дорівнює

$$\beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}. \quad (6)$$

В сучасних силових трансформаторах відношення $\frac{P_0}{P_k} = 0,2 \dots 0,4$, а максимальне значення ККД можна отримати при навантаженні $\beta = 0,45 \dots 0,65$, яке відповідає середньому річному навантаженні при експлуатації силових трансформаторів.

На рисунку 2.4 наведений графік залежності ККД силового трансформатора від коефіцієнту навантаження.

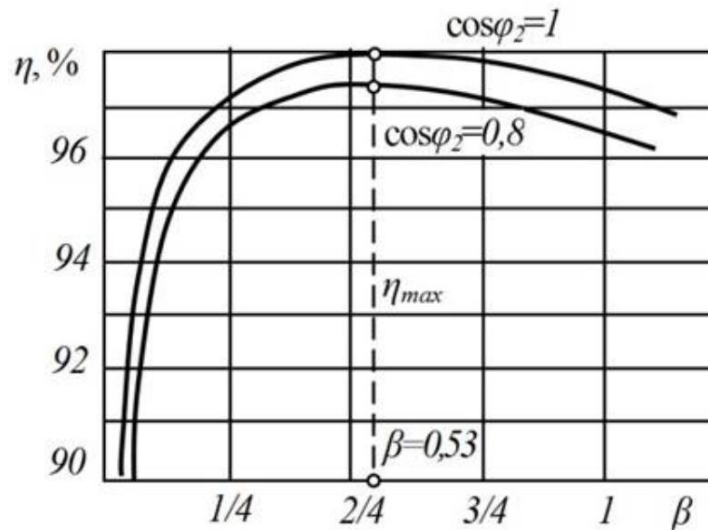


Рисунок 2.4 - Графік залежності ККД силового трансформатора від коефіцієнту завантаження

Максимальний ККД трансформатора визначається за виразом

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_{ном} \cdot \cos \varphi_2 + 2 \cdot P_{0ном}}. \quad (7)$$

Окрім ККД за потужністю використовується означення «ККД за енергією», а саме, це є коефіцієнт корисної дії, який дорівнює відношенню електроенергії, яка віддається трансформатором споживачеві, $W_2, кВт \cdot год$, протягом року до електроенергії, яка отримана трансформатором з мережі живлення, $W_1, кВт \cdot год$, протягом року. ККД силового трансформатора за енергією характеризує ефективність експлуатації силового трансформатора.

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці Б.1, що наведена в додатку Б, записати паспортні дані заданого силового трансформатора в таблицю 1 звіту до лабораторної роботи.

2. За паспортними даними трансформатора визначити коефіцієнт навантаження трансформатора, при якому ККД трансформатора буде максимальний. Результат розрахунку навести в пункті 3 звіту з лабораторної роботи.

3. Розрахувати величини ККД силового трансформатора, $\eta, \%$, при зміні коефіцієнту навантаження, $\beta, в.о.$, та при коефіцієнті потужності $\cos \varphi_2 = 1$

(характер навантаження - активний) (див. формулу (5) з пункту «Основні теоретичні відомості»). Результати розрахунків навести в таблиці 2 звіту з лабораторної роботи.

4. Розрахувати величини ККД силового трансформатора, η , %, при зміні коефіцієнту навантаження, β , в.о., та при коефіцієнті потужності $\cos\varphi_2=0,8$ (характер навантаження – активно-індуктивний). Результати розрахунків навести в таблиці 2 звіту з лабораторної роботи.

5. Побудувати графіки ККД силового трансформатора $\eta = f(\beta)$ та при $\cos\varphi_2=1$ та $\cos\varphi_2=0,8$ з обов'язковим розрахунком значення максимального ККД трансформатора, η_{max} (див. формулу (6) з пункту «Основні теоретичні відомості») – рисунок 1 звіту з лабораторної роботи.

6. Розрахувати сумарні втрати в трансформаторі, $\sum p$, Вт, при зміні навантаження, β , в.о. Результати навести в таблиці 3 звіту з лабораторної роботи.

7. Побудувати графічну залежність сумарних втрат в трансформаторі при зміні навантаження – рисунок 2 звіту з лабораторної роботи.

8. Визначити вартість витрат електроенергії в силовому трансформаторі через 1000 годин роботи при його завантаженні на 80 %. Результат розрахунку навести в пункті 8 звіту з лабораторної роботи.

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Паспортні дані силового трансформатора

Номер варіанту	Тип силового трансформа- тора	S_n , кВА	На- пруга обмо- тки ВН U_{1n} , кВ	На- пруга обмо- тки НН U_{2n} , кВ	Схема та група з'єд- нання	Втрати, Вт		$u_k\%$, %	$i_0\%$, %	d , м
						P_o	$P_{к.ном}$			

3. Результати визначення коефіцієнту завантаження трансформатора, при якому ККД трансформатора буде максимальний

$$\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\kappa, \text{ном}}}}; \beta_m =$$

4. Таблица 2 – Результати розрахунків згідно виразу (5)

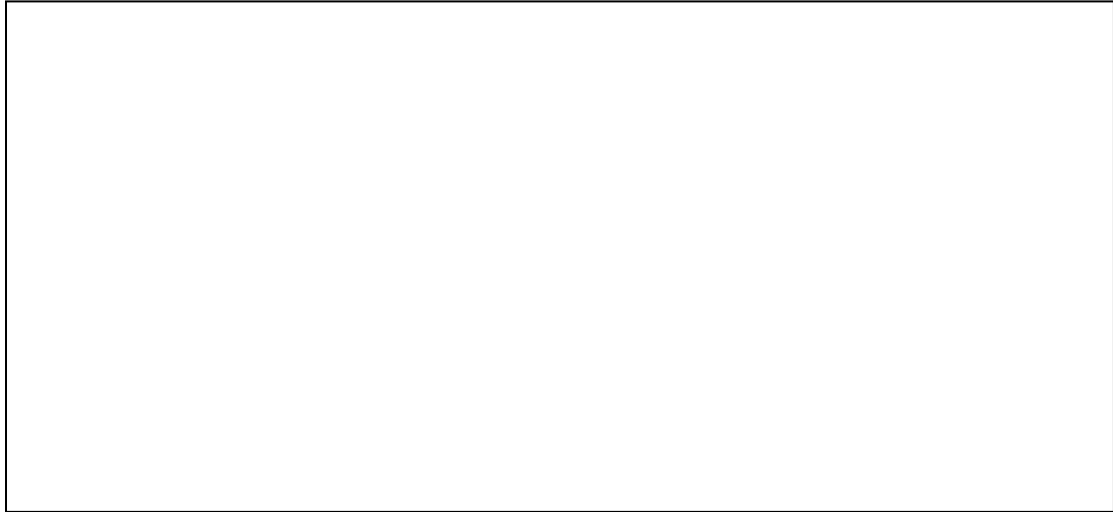
$\cos\varphi_2=1$	$\beta, \text{ в.о.}$	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,4
	$\eta, \%$									
$\cos\varphi_2=0,8$	$\beta, \text{ в.о.}$	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,4
	$\eta, \%$									



5. Рисунок 1 - Графічні залежності ККД силового трансформатора від коефіцієнту навантаження, $\eta = f(\beta)$, при $\cos\varphi_2=1$ та $\cos\varphi_2=0,8$

6. Таблица 3 - Результати розрахунків

$\beta, \text{ в.о.}$	0	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1,0	1,4
$P_0, \text{ Вт}$									
$P_{\kappa} = \beta^2 \cdot P_{\kappa, \text{н}}, \text{ Вт}$	0								
$\Sigma p = P_0 + \beta^2 \cdot P_{\kappa, \text{н}}, \text{ Вт}$									



7. Рисунок 2 – Графічна залежність сумарних втрат в силовому трансформаторі при зміні навантаження

8. Результат розрахунку вартості втрат електроенергії, $B_{\text{втрат}}$, грн., в силовому трансформаторі через 1000 годин роботи при його завантаженні на 80 % згідно виразу

$$B_{\text{втрат}} = (P_0 + \beta^2 P_{\text{к.ном}}) \cdot 1000 \cdot C_{\text{ел.енергії}},$$

де $C_{\text{ел.енергії}}$ – ціна 1 кВт·год. електроенергії, грн.

9. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Лабораторна робота
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ
ТА ПОБУДОВИ ЗОВНІШНІХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи:

Практичне застосування набутих навичок при проведенні досліджень методики розрахунку та побудови зовнішніх характеристик силового трансформатора за паспортними даними з урахуванням характеру навантаження.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- означення зовнішніх характеристик силового трансформатора;
- означення зміни вторинної напруги силового трансформатора;
- загальний вид зовнішніх характеристик трансформатора з урахуванням характеру навантаження;
- аналітичні вирази для визначення: зміни вторинної напруги трансформатора з урахуванням значень напруг короткого замикання й коефіцієнта потужності; складових напруг короткого замикання; коефіцієнту потужності при короткому замиканні; лінійної напруги короткого замикання; номінального струму обмотки вищої напруги трансформатора.

Ознайомитись з:

- методикою розрахунку та побудови зовнішніх характеристик силового трансформатора [1, с.66, 2, с.96-98].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...3, рисунок 1 – Зовнішні характеристики силового трансформатора при активному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 1,0$); при активно-індуктичному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 0,8$); при активно-ємнісному навантаженні ($\cos \varphi_2 = - 0,8$);

рисунок 2 – Графічна залежність $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$ при номінальному навантаженні $\beta = 1$ та при зміні $\cos\varphi_2$ від 0,2 до 1,0;

- висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 7».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Як поділяються робочі характеристики силового трансформатора?
2. Які характеристики силового трансформатора є зовнішніми? Наведіть їх графічний вигляд.
3. Яка напруга приймається за номінальну вторинну напругу силових трансформаторів?
4. Що таке зміна вторинної напруги трансформатора? За яким аналітичним виразом вона визначається? Як визначається зміна вторинної напруги у відсотках?
5. Як визначити величину зміни вторинної напруги з урахуванням коефіцієнта навантаження?
6. Наведіть графік залежності $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$ при номінальному навантаженні $\beta = 1$ й при зміні $\cos\varphi_2$ та охарактеризуйте його.
7. Опишіть методику розрахунку і побудови зовнішніх характеристик трансформатора за паспортними даними й при зміні коефіцієнту потужності навантаження.

1.3 Рекомендована література

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.
2. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.

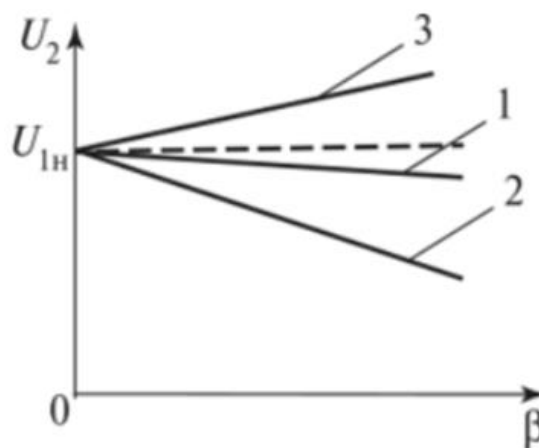
2. Основні теоретичні відомості

Основні експлуатаційні властивості силових трансформаторів при зміні струмів навантаження визначаються **робочими характеристиками**, до яких належать:

- **зовнішні характеристики** – це залежності $U_2 = f(I_2)$ або $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1ном} = const$, $f_1 = f_{ном} = const$ та $\cos\varphi_2 = const$;
- **характеристики коефіцієнту потужності** – це залежності $\cos\varphi_1 = f(\beta)$ при $\cos\varphi_2 = const$ та $U_{1ном} = const$;
- **струмові характеристики** - це залежності $I_1 = f(\beta) = f(I_2)$ при $U_{1ном} = const$ та $f_{1н} = const$;
- **характеристики ККД** - це залежності $\eta = f(\beta)$ при $U_{1ном} = const$, $\cos\varphi_2 = const$; $f_{1н} = const$.

Зовнішні характеристики силового трансформатора – це залежності $U_2 = f(I_2)$ або $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1ном} = const$, $f_1 = f_{ном} = const$ та $\cos\varphi_2 = const$.

Графічний вигляд зовнішніх характеристик силового трансформатора наведений на рисунку 2.1.



1 – при активному характері навантаження;

2 – при активно-індуктивному характері навантаження;

3 – при активно-ємнісному характері навантаження

Рисунок 2.1 - Загальний вид зовнішніх характеристик трансформатора

За номінальну вторинну напругу силових трансформаторів приймається напруга при холостому ході, U_{20} , так як вона розраховується таким чином, щоб при холостому ході трансформатора та напрузі $U_1 = U_{1ном}$ вторинна напруга дорівнювала номінальній вторинній напрузі $U_2 = U_{2ном}$. В режимі навантаження при зміні струму навантаження, I_2 , вторинна напруга також змінюється, при цьому на величину U_2 також впливає характер навантаження $\cos \varphi_2$.

Зміна вторинної напруги трансформатора, Δu_2 – це арифметична різниця між значеннями вторинної напруги трансформатора при холостому ході, U_{20} , та напругою при номінальному навантаженні, U_2 , та при постійних $U_{1ном}$ й $f_{ном}$. Величина Δu_2 визначається за виразом

$$\Delta u_2 = U_{20} - U_2, \quad (1)$$

де U_2 – напруга при струмі навантаження $I_2 = I_{2ном}$, тобто коефіцієнт навантаження, β , дорівнює 1;

$$U_2 = U_{2н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100\%} \right). \quad (2)$$

Зміну вторинної напруги визначають у відсотках за виразом

$$\Delta u_2 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

З урахуванням значень напруг короткого замикання, $u_{ка}\%$, $u_{кр}\%$ та $u_{к\%}$ й коефіцієнту навантаження, β , та коефіцієнту потужності, $\cos \varphi_2$, зміна вторинної напруги трансформатора, Δu , буде дорівнювати

$$\Delta u_2 = \beta \cdot (u_{ка\%} \cdot \cos \varphi_2 + u_{кр\%} \cdot \sin \varphi_2). \quad (4)$$

При цьому складові напруги короткого замикання, $u_{ка,а}\%$ та $u_{к,р}\%$, визначаються за виразами

$$u_{ка,а\%} = u_{к\%} \cdot \cos \varphi_k, \quad (5)$$

$$u_{к,р\%} = u_{к\%} \cdot \sin \varphi_k. \quad (6)$$

Значення напруги короткого замикання, $u_{к\%}$, визначається за паспортними даними силового трансформатора.

Значення коефіцієнту потужності при короткому замиканні, $\cos\varphi_k$, визначається за паспортними даними трансформатора за виразом

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{к.ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{к.л} \cdot I_{1н}}, \quad (7)$$

Значення лінійної напруги короткого замикання, $U_{к.л}$, B , визначається за виразом

$$U_{к.л} = \frac{u_{к\%} \cdot U_{1н}}{100}. \quad (8)$$

Значення номінального струму обмотки вищої напруги трансформатора, $I_{1н}$, A , визначається за виразом

$$I_{1н} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1н}}. \quad (9)$$

На рисунку 2.2 наведена графічна залежність $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$ при номінальному навантаженні $\beta = 1$

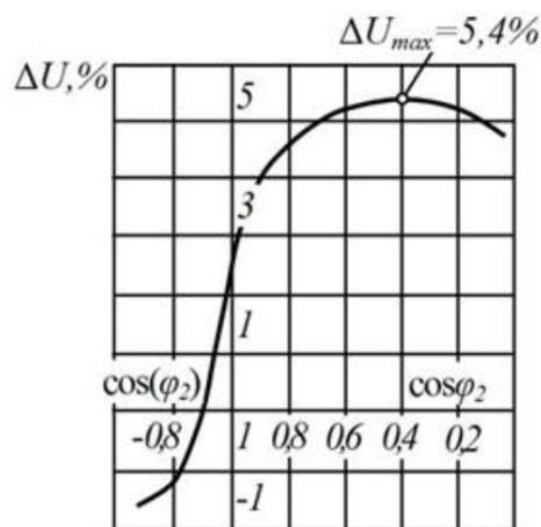


Рисунок 2.2 - Графічна залежність $\Delta u = f(\cos\varphi_2)$

Частина графічної залежності справа від осі ординат відповідає активно-індуктивному навантаженню ($\varphi_2 > 0$), а частина графічної залежності зліва від осі ординат відповідає активно-ємнісному навантаженню ($\varphi_2 < 0$).

Аналіз графічної залежності показав, що при активно-індуктивному навантаженні зміна вторинної напруги більша, ніж нуль ($\Delta u_2 > 0$), тому то вторинна напруга U_2 знижується.

У випадку активно-ємнісного навантаження ($\cos\varphi_2 = -0,9$) зміна вторинної напруги менша, ніж нуль ($\Delta u < 0$), тому то вторинна напруга U_2 збільшується.

Розглянемо методику розрахунку та побудови зовнішніх характеристик силового трансформатора за паспортними даними й при зміні коефіцієнту потужності навантаження:

- записати паспортні дані силового трансформатора в таблицю.

Таблиця – Паспортні дані силового трансформатора

Тип силового трансформатора	$S_n, \text{кВА}$	Напруга обмотки ВН $U_{1H}, \text{кВ}$	Напруга обмотки НН $U_{2H}, \text{кВ}$	Схема та група з'єднання	Втрати, Вт		$u_k\%, \%$	$i_0\%, \%$
					P_o	$P_{к.ном}$		

- розрахувати значення величин:

1. номінальний струм обмотки вищої напруги трансформатора за виразом (9)

$$I_{1H} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1H}};$$

2. лінійна напругу короткого замикання за виразом (8)

$$U_{к.л} = \frac{u_{к\%} \cdot U_{1H}}{100};$$

3. коефіцієнт потужності при короткому замиканні за виразом (7)

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{к.ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{к.л} \cdot I_{1H}};$$

4. складові напруги короткого замикання за виразами (5) та (6)

$$u_{\kappa.a\%} = u_{\kappa\%} \cdot \cos\varphi_{\kappa};$$

$$u_{\kappa.p\%} = u_{\kappa\%} \cdot \sin\varphi_{\kappa};$$

- розрахувати значення зміни вторинної напруги трансформатора, Δu_2 , за виразом (4) з урахуванням коефіцієнту навантаження, $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$, та коефіцієнту потужності, а саме:

$\cos\varphi_2 = 1,0$ (активний характер навантаження);

$\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-індуктивний характер навантаження);

$\cos\varphi_2 = -0,8$ (активно-ємнісний характер навантаження) за виразом

$$\Delta u_2 = \beta \cdot (u_{\kappa a\%} \cdot \cos\varphi_2 + u_{\kappa p\%} \cdot \sin\varphi_2);$$

- розрахувати значення вторинної напруги, U_2 , з урахуванням коефіцієнту навантаження, $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$, та коефіцієнту потужності, а саме:

$\cos\varphi_2 = 1,0$ (активний характер навантаження);

$\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-індуктивний характер навантаження);

$\cos\varphi_2 = -0,8$ (активно-ємнісний характер навантаження) за виразом (2)

$$U_2 = U_{2н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100\%}\right);$$

- побудувати зовнішні характеристики заданого силового трансформатора:

$U_2 = f(\beta)$ з урахуванням коефіцієнту потужності, а саме:

$\cos\varphi_2 = 1,0$ (активний характер навантаження);

$\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-індуктивний характер навантаження);

$\cos\varphi_2 = -0,8$ (активно-ємнісний характер навантаження);

- побудувати графік залежності $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$ при номінальному навантаженні $\beta = 1$ та при зміні $\cos\varphi_2$.

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці Б.1, що наведена в додатку Б, записати паспортні дані заданого силового трансформатора в таблицю 1 звіту з лабораторної роботи.

2. За паспортними даними трансформатора визначити:

- номінальний струм обмотки вищої напруги трансформатора, I_{In} , А;
- лінійну напругу короткого замикання, $U_{к.л}$, В;
- коефіцієнт потужності при короткому замиканні, $\cos\varphi_k$, в.о.;
- складові напруги короткого замикання, $u_{к.а}\%$ та $u_{к.р}\%$.

3. Результати розрахунку навести в таблиці 2 звіту з лабораторної роботи.

4. Розрахувати значення зміни вторинної напруги трансформатора, Δu_2 , з урахуванням коефіцієнту навантаження, $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$, та коефіцієнту потужності, а саме: $\cos\varphi_2 = 1,0$ (активний характер навантаження); $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-індуктивний характер навантаження); $\cos\varphi_2 = -0,8$ (активно-ємнісний характер навантаження) (див. формулу (4) з пункту «Основні теоретичні відомості»). Результати розрахунку навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи.

5. Розрахувати значення вторинної напруги, U_2 , з урахуванням коефіцієнту навантаження, $\beta = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2$, та коефіцієнту потужності, а саме: $\cos\varphi_2 = 1,0$ (активний характер навантаження); $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-індуктивний характер навантаження); $\cos\varphi_2 = -0,8$ (активно-ємнісний характер навантаження) (див. формулу (2) з пункту «Основні теоретичні відомості»).

$$U_2 = U_{2н} \cdot \left(1 - \frac{\Delta u}{100\%}\right);$$

5. Результати розрахунку навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи.

6. Побудувати зовнішні характеристики заданого силового трансформатора: $U_2 = f(\beta)$ з урахуванням коефіцієнту потужності, а саме: $\cos\varphi_2 = 1,0$ (активний характер навантаження); $\cos\varphi_2 = 0,8$ (активно-індуктивний характер

навантаження); $\cos\varphi_2 = -0,8$ (активно-ємнісний характер навантаження) – рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

7. Побудувати графік залежності $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$ при номінальному навантаженні $\beta = 1$ та при зміні $\cos\varphi_2$ від 0,2 до 1,0 – рисунок 2 звіту до лабораторної роботи.

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Паспортні дані силового трансформатора

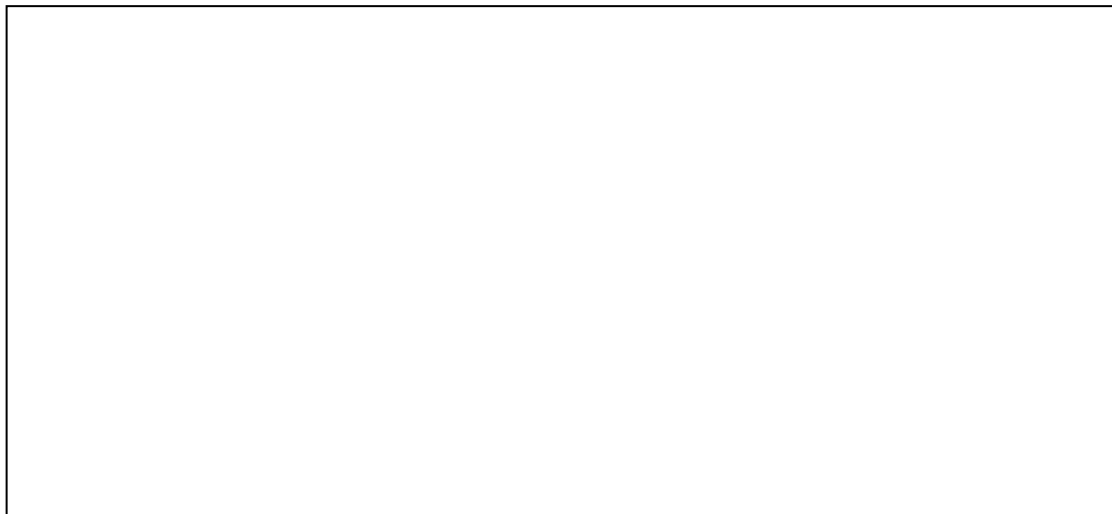
Номер варіанту	Тип силового трансформа- тора	S_n , кВА	На- пруга обмот- ки ВН U_{1n} , кВ	На- пруга обмот- ки НН U_{2n} , кВ	Схема та група з'єд- нання	Втрати, Вт		$u_k\%$, %	$i_0\%$, %	d , м
						P_o	$P_{к.ном}$			

3. Таблиця 2 – Результати розрахунків

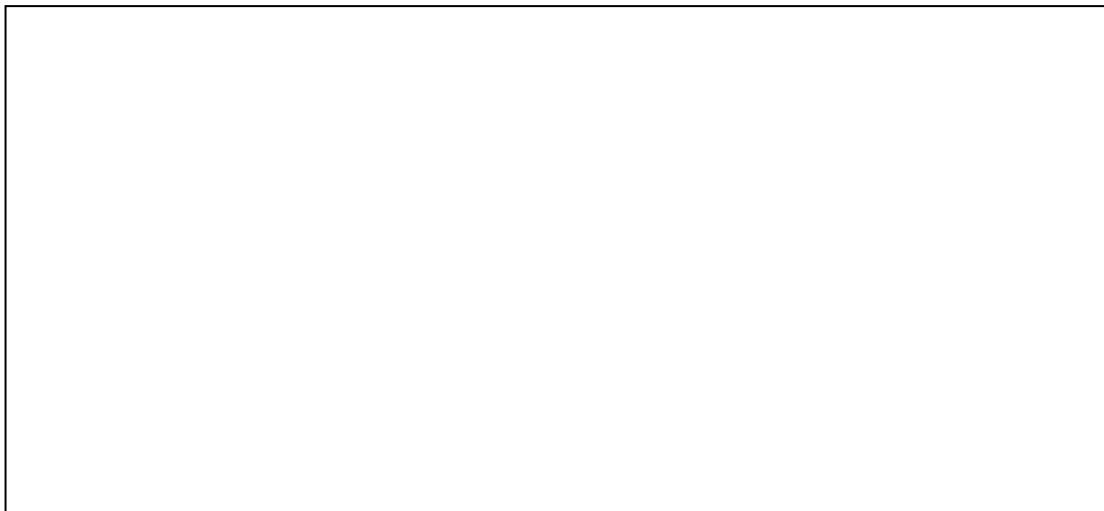
Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Номінальний струм обмотки вищої на- пруги трансформатора	I_{1n} , А	$I_{1n} = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1n}}$	$I_{1n} =$
Лінійна напругу короткого замикання	$U_{к.л}$, В	$U_{к.л} = \frac{u_{к\%} \cdot U_{1n}}{100}$	$U_{к.л} =$
Коефіцієнт потужності при короткому замиканні	$\cos\varphi_k$, в.о.	$\cos\varphi_k = \frac{P_{к.ном} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{к.л} \cdot I_{1n}}$	$\cos\varphi_k =$
Складові напруги короткого замикання	$u_{к.а}$, %	$u_{к.а\%} = u_{к\%} \cdot \cos\varphi_k$	$u_{к.а\%}$
	$u_{к.р}$, %	$u_{к.р\%} = u_{к\%} \cdot \sin\varphi_k$	$u_{к.р\%}$

4. Таблиця 3 – Результати розрахунків зовнішньої характеристики
силового трансформатора

Характер навантаження		Величини, що розраховані: U_2, B та $\Delta u_2, B$						
		при коефіцієнті навантаження, β						
		0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$\cos\varphi_2=1,0$ (активний)	Δu_2	0						
	U_2	400						
$\cos\varphi_2=0,8$ (активно-індуктивний)	Δu_2	0						
	U_2, B	400						
$\cos\varphi_2= - 0,8$ (активно-ємнісний)	Δu_2	0						
	U_2, B	400						



5. Рисунок 1 - Зовнішні характеристики силового трансформатора
при активному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 1,0$);
при активно-індуктичному навантаженні ($\cos \varphi_2 = 0,8$);
при активно-ємнісному навантаженні ($\cos \varphi_2 = - 0,8$)



6. Графічна залежність $\Delta u_2 = f(\cos\varphi_2)$

при номінальному навантаженні $\beta = 1$ та при зміні $\cos\varphi_2$ від 0,2 до 1,0;

7. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Лабораторна робота

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ І ВЕЛИЧИН, ЩО ВИЗНАЧАЮТЬ ВЛАСТИВОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З К.З.РОТОРОМ ЗА ПАСПОРТНИМИ ДАНИМИ

Мета роботи:

Практичне застосування набутих навичок при проведенні досліджень енергетичних показників і величин, що визначають основні властивості асинхронного електродвигуна з к.з. ротором за паспортними даними.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- означення асинхронної машини змінного струму;
- принцип дії асинхронної машини в режимі асинхронного електродвигуна;
- конструктивне виконання асинхронного електродвигуна (АД) з короткозамкненим (к.з.) ротором;
- типорозміри та номінальні потужності електродвигуна;

Ознайомитись з:

- умовним літерно-цифровим позначенням типу асинхронного електродвигуна;
- аналітичними виразами для визначення енергетичних показників і величин, що визначають основні властивості АД за паспортними даними: номінальний струм АД; номінальна частота обертання магнітного поля статора АД; номінальне ковзання АД; номінальна кутова швидкість АД; номінальний момент АД; синхронна кутова швидкість магнітного поля статора АД; ковзання АД при нерухомому роторі; частота струму в роторі при номінальному навантаженні АД; потужності, що споживає АД при номінальному навантаженні (активну, реактивну та повну); активний опір фази обмотки статора АД при розрахунковій температурі; сумарні номінальні втрати в АД; електричні втрати в обмотці статора АД при номінальному навантаженні [1, с. 166-170; 2, с.384-387, 3, с. 239- 264; 4, с. 257-264].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...3, рисунок 1 - Схема електрична принципова включення приладів до трифазного три провідного кола змінного струму для вимірювання номінальної активної потужності, P_n , номінальної напруги живлення, U_n , номінального струму, I_n , номінальної частоти f_{1n} , номінальної частоти обертання n_n , номінального коефіцієнту потужності, $\cos\varphi_n$;
- висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 8».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Що таке асинхронна машина змінного струму? Яке призначення та види асинхронних машин вам відомі?
2. Опишіть принцип дії асинхронного електродвигуна. Які характерні особливості принципу дії АД?
3. Опишіть конструктивне виконання асинхронного електродвигуна з к.з. ротором.
4. Які типорозміри та номінальні потужності АД вам відомі?
5. Які величини є паспортними та номінальними даними АД?
6. Як аналітично розрахувати енергетичних показників і величин, що визначають за паспортними даними властивості АД з к.з. ротором?

1.3 Рекомендована література

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.

2. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.

3. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф., Смуригин В. М., Ковальов О. В., Вужицкий А. В. Электричні машини і апарати: навчальний посібник. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

4. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Электричні машини: підручник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

2. Основні теоретичні відомості

Асинхронна машина змінного струму – це обертова електрична машина змінного струму, в якій частота обертання ротора не дорівнює частоті обертання магнітного поля статора та змінюється при зміні навантаження у межах номінального, тобто ротор та поле статора обертаються не синхронно або асинхронно.

За призначенням асинхронні машини поділяються на загального та спеціального призначення. До машин загального призначення належать асинхронні електродвигуни промислової частоти 50 або 60 *Гц*, з числом фаз: одно-, дво- та трифазні, напругою до 1000 *В*. До спеціальних асинхронних машин належать: асинхронні генератори, лінійні асинхронні двигуни, електромашинні індукційні регулятори, фазорегулятори, асинхронні перетворювачі частоти, асинхронні мікромашини систем автоматики.

Найчастіше асинхронна машина застосовується для перетворення електричної енергії в механічну, тобто як електродвигун. В електроприводі промислових установок найбільшого розповсюдження набули трифазні асинхронні електродвигуни АД, потужністю від 0,06 до 400 *кВт*, так як характеризуються простотою будови та малою собівартістю виробництва.

Розглянемо опис принципу дії АД. Основними конструктивними елементами асинхронної машини є статор з обмоткою змінного струму та ротор з обмоткою ротора (короткозамкненою або фазною). Між статором та ротором є повітряний зазор, який для збільшення електромагнітного зв'язку між обмотками є малим.

При підключенні обмотки статора до мережі змінного струму по обмотках проходить струм та створюється обертальне магнітне поле, яке буде перетинати провідники обмоток ротора та індукувати в них ЕРС та струми. В результаті взаємодії магнітного поля статора зі струмами в провідниках обмотки ротора створюється електромагнітний момент, під дією якого ротор електродвигуна починає обертатися зі швидкістю меншою, ніж швидкість обертання магнітного поля, тобто ротор буде відставати від магнітного поля статора або буде ковзати відносно його. Мірою відставання ротора від магнітного поля статора є **ковзання**.

Характерними особливостями принципу дії АД є:

- обов'язковою умовою роботи АД є наявність ковзання, так як в обмотці ротора виникають ЕРС та струми, як наслідок створюється електромагнітний момент;
- ЕРС та струми в роторі залежать від ковзання: $f_2 = s \cdot f_1$;
- частота в роторі залежить від ковзання та змінюється при роботі АД.

Конструктивне виконання асинхронного електродвигуна з к.з. ротором: вал; підшипники; підшипникові щити; коробка виводів; вентилятор; кожух вентилятора; осердя ротора з короткозамкненою обмоткою; осердя статора з обмоткою; корпус; станина.

Корпус з підшипниковими щитами створюють зовнішню оболонку електродвигуна, яка для кращого охолодження виконується ребристою. Вентилятор закритий кожухом. Корпус та підшипникові щити в залежності від потужності виконуються зі сталі, алюмінію та чавуна. Осердя статора виконане з листів електротехнічної сталі, в пазах осердя розташована трифазна обмотка з мідного обмотувального проводу з класом нагрівостійкості ізоляції В та F. Обмотка ротора – це короткозамкнена обмотка типу «біляча клітка». В електричному відношенні така обмотка – це багатофазна обмотка змінного струму з кількістю фаз, яка дорівнює кількості пазів ротора, тому то така обмотка характеризується високою надійністю в процесі експлуатації.

В асинхронних електродвигунах важливе значення має типорозмір Н, який має назву висота вісі обертання. Висота вісі обертання – це відстань від центра

вала до опорної площини машини. Ця величина пов'язана з потужністю, габаритами та установочними й приєднувальними розмірами електродвигунів. Для електродвигунів основного виконання висота вісі обертання є стандартизованою та дорівнює 50; 56; 63; 71; 80; 90; 100; 112; 13; 160; 180; 200; 225; 250; 280; 315; 335 мм.

Ряд номінальних потужностей АД за державним стандартом має вигляд: 0,06; 0,09; 0,12; 0,18; 0,25; 0,37; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0; 5,5; 7,5; 11; 15; 18,5; 22; 30; 37; 45; 55; 75; 90; 110; 132; 160; 200; 250; 280; 315; 355 та 400 кВт.

АД, що випускаються промисловістю, мають паспортну табличку в вигляді металевої пластини, закріпленої на корпусі електродвигуна, в якій наведені тип АД, його номінальні дані, а також наступні відомості: схема з'єднання обмоток, ступінь захисту; завод-виробник, рік випуску, маса та клас ізоляції.

До паспортних даних АД належать: число фаз; частота мережі живлення, f_1 , Гц; номінальні лінійні напруги обмотки статора при з'єднанні «трикутник» та «зірка»; номінальні лінійні струми при з'єднанні «трикутник» та «зірка»; P_n , кВт; номінальна частота обертання n_n , об/хв.; номінальний коефіцієнт корисної дії, η_n , %; номінальний коефіцієнт потужності, $\cos\varphi_n$, в.о.; режим роботи S.

До номінальних даних АД належать й величини, які не вказуються в паспортній табличці, наприклад номінальний момент, M_n , Н·м; номінальна швидкість обертання, ω_n , об/хв.; номінальне ковзання, s_n , в.о., які відповідно визначаються за формулами

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}; \quad (1)$$

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}; \quad (2)$$

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}, \quad (3)$$

при цьому номінальна частота обертання магнітного поля статора АД дорівнює

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (4)$$

де p – число пар полюсів, визначається з позначення типу електродвигуна.

Для визначення величин енергетичних показників і величин, що визначають за паспортними даними властивості АД з к.з. ротором застосовуються аналітичні вирази:

- номінальний струм АД

$$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}; \quad (5)$$

- номінальна частота обертання магнітного поля статора АД

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}; \quad (6)$$

- номінальне ковзання АД

$$s_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}; \quad (7)$$

- номінальна кутова швидкість АД

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}; \quad (8)$$

- ковзання АД при нерухомому роторі

$$s_{(n=0)} = \frac{n_1 - n}{n_1}; \quad (9)$$

- номінальний момент АД

$$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}; \quad (10)$$

- частота струму в роторі при номінальному навантаженні АД

$$f_{2s} = f_{1s} \cdot s_n; \quad (11)$$

- потужності, що споживає АД при номінальному навантаженні:

- активна потужність

$$P_{1n} = \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n}; \quad (12)$$

- повна потужність

$$S_{1H} = \frac{P_{1H}}{\cos\varphi_H}; \quad (13)$$

- реактивна потужність

$$Q_{1H} = \sqrt{S_{1H}^2 - P_{1H}^2}. \quad (14)$$

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці В.1, що наведена в додатку В, записати паспортні дані заданого асинхронного електродвигуна в таблицю 1.

2. Розшифрувати умовне літерно-цифрове позначення типу заданого електродвигуна. Результати навести в таблицю 2 звіту до лабораторної роботи.

3. Визначити розрахунковим методом енергетичні показники і величини, що визначають основні властивості АД за паспортними даними:

- номінальний струм АД;
- номінальну частоту обертання магнітного поля статора АД;
- номінальне ковзання АД;
- номінальну кутову швидкість АД;
- номінальний момент АД;
- синхронну кутову швидкість магнітного поля статора АД;
- величину ковзання АД при нерухомому роторі;
- частоту струму в роторі при номінальному навантаженні АД;
- потужності, що споживає АД при номінальному навантаженні (активну, реактивну та повну);
- активний опір фази обмотки статора АД при розрахунковій температурі;
- сумарні номінальні втрати в АД;
- електричні втрати в обмотці статора АД при номінальному навантаженні.

4. Результати розрахунків навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи.

5. Розробити схему електричну принципову включення приладів до трифазного три провідного кола змінного струму для вимірювання номінальної активної потужності, P_n , номінальної напруги живлення, U_n , номінального струму, I_n , номінальної частоти f_{1n} , номінальної частоти обертання n_n , номінального коефіцієнту потужності, $\cos\varphi_n$, при цьому прийняти, що АД має схему з'єднання статорних обмоток «зірка».

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Паспортні дані асинхронного електродвигуна

Варіант	Тип АД	P_n , кВт	n_n , об/хв.	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	U_{1n} , В	$R_{1(20^\circ\text{C})}$, Ом

Таблиця 2 – Умовне літерно-цифрове позначення типу АД

$\frac{5A}{1} \frac{X}{2} \frac{X}{3} \frac{X}{4} \frac{X}{5} \frac{X}{6} \Rightarrow$ _____
 (тип заданого АД)

Варіант	
Тип АД	
1 літерно-цифрове позначення	
2 цифрове позначення	
3 літерне позначення	
4 літерне позначення	
5 цифрове позначення	
6 літерно-цифрове позначення	

4. Таблиця 3 – Результати розрахунків енергетичних показників і величин, що визначають основні властивості АД за паспортними даними

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Номінальний струм АД	I_n, A	$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}$	$I_n =$
Номінальна частота обертання магнітного поля статора АД	$n_{1n}, об/хв$	$n_{1n} = \frac{60 \cdot f_{1n}}{p}$	$n_{1n} =$
Номінальне ковзання АД	$s_n, в.о.$	$s_n = \frac{n_{1n} - n_n}{n_{1n}}$	$s_n =$
Номінальна кутова швидкість АД	$\omega_n, рад/с$	$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}$	$\omega_n =$
Ковзання АД при нерухомому роторі	$s_{(n=0)}, в.о.$	$s_{(n=0)} = \frac{n_{1n} - n}{n_{1n}}$	$s_{(n=0)} =$
Номінальний момент АД	$M_n, Н \cdot м$	$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}$	$M_n =$
Частота струму в роторі при номінальному навантаженні АД	$f_{2s}, Гц$	$f_{2s} = f_{1s} \cdot s_n$	$f_{2s} =$
Активний опір фази обмотки статора АД при розрахунковій температурі	$R_{1tp}, Ом$	$R_{1tp} = R_{1(20^0 C)} \frac{235 + t_p}{235 + 20}$	$R_{1tp} =$
Сумарні номінальні втрати в АД	$\Delta P_n, Вт$	$\Delta P_n = P_n \frac{1 - \eta_n}{\eta_n}$	$\Delta P_n =$
Електричні втрати в обмотці статора АД при номінальному навантаженні	$\Delta P_{el}, Вт$	$\Delta P_{el} = 3 I_n^2 \cdot R_{1tp}$	$\Delta P_{el} =$

Продовження таблиці 3

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Потужності, що споживає АД при номінальному навантаженні: - активна потужність	$P_{н1}, Вт$	$P_{1н} = \frac{P_n \cdot 10^3}{\eta_n}$	$P_{н1} =$
- повна потужність	$S_{н1}, ВА$	$S_{1н} = \frac{P_{1н}}{\cos \varphi_n}$	$S_{н1} =$
- реактивна потужність	$Q_{н1}, ВАр$	$Q_{1н} = \sqrt{S_{1н}^2 - P_{1н}^2}$	$Q_{н1} =$

Примітка до таблиці 3:

- для АД з висотою осі обертання менша або дорівнює ≤ 132 мм розрахункову робочу температуру прийняти таку, як $t_p = 75^{\circ}C$;
- для АД з висотою осі обертання більша або дорівнює 160 мм розрахункову робочу температуру прийняти таку, як $t_p = 115^{\circ}C$.



5. Рисунок 1 – Схема електрична принципова включення приладів до трифазного трипровідного кола змінного струму для вимірювання номінальної активної потужності, номінальної напруги живлення, номінального струму, номінальної частоти, номінальної частоти обертання, номінального коефіцієнту потужності

6. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Лабораторна робота
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ТА
ПОБУДОВИ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА З К.З. РОТОРОМ

Мета роботи:

Практичне застосування методики розрахунку і побудови робочих характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором за паспортними даними.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- означення робочих характеристик асинхронного електродвигуна (АД) з короткозамкненим (к.з.) ротором;
- загальний вид робочих характеристик АД з к.з. ротором;
- коротке фізичне пояснення робочих характеристик та властивостей АД.

Ознайомитись з:

- методикою розрахунку та побудови робочих характеристик АД з к.з. ротором [1, с.210-211, 2.с.439-442, 4, с. 257-264].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...6, рисунок 1 – Робочі характеристики АД;
- висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 9».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Що таке робочі характеристики АД?

2. Наведіть загальний вид робочих характеристик АД.

3. Надайте коротке фізичне пояснення робочим характеристикам $n_2 = f(P_2)$

та $s = f(P_2)$.

4. Надайте коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $I_1 = f(P_2)$.

5. Надайте коротке фізичне пояснення робочим характеристикам $M_2 = f(P_2)$

та $M = f(P_2)$.

6. Надайте коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $\eta = f(P_2)$.

7. Надайте коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $P_1 = f(P_2)$.

8. Надайте коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $\cos\varphi_1 = f(P_2)$.

1.3 Рекомендована література

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.

2. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.

3. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф., Смуригін В. М., Ковальов О. В., Вужицький А. В. Електричні машини і апарати: навчальний посібник. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.

4. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Електричні машини: підручник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

2. Основні теоретичні відомості

Робочі характеристики асинхронного електродвигуна – це залежності різних електричних та механічних параметрів електродвигуна від потужності на валу за умови роботи при номінальних значеннях напруги і частоті мережі живлення, тобто $n_2; P_1; I_1; \eta; \cos\varphi_1; M_2; M = f(P_2)$ при $U_{1ном} = const$, $f_{1ном} = const$.

Розрізняють такі робочі характеристики:

- залежність частоти обертання ротора від потужності на валу: $n_2 = f(P_2)$;

- залежність ковзання від потужності на валу: $s = f(P_2)$;
- залежність лінійного струму, що споживається із мережі, від потужності на валу: $I_1 = f(P_2)$;
- залежність потужності, що споживається з мережі живлення, від потужності на валу: $P_1 = f(P_2)$;
- залежність моменту на валу від потужності на валу: $M_2 = f(P_2)$;
- залежність електромагнітного моменту від потужності на валу: $M = f(P_2)$;
- залежність коефіцієнта корисної дії електродвигуна від потужності на валу: $\eta = f(P_2)$;
- залежність коефіцієнта потужності від потужності на валу: $\cos \phi_1 = f(P_2)$.

Загальний вид робочих характеристик АД наведений на рисунку 2.1.

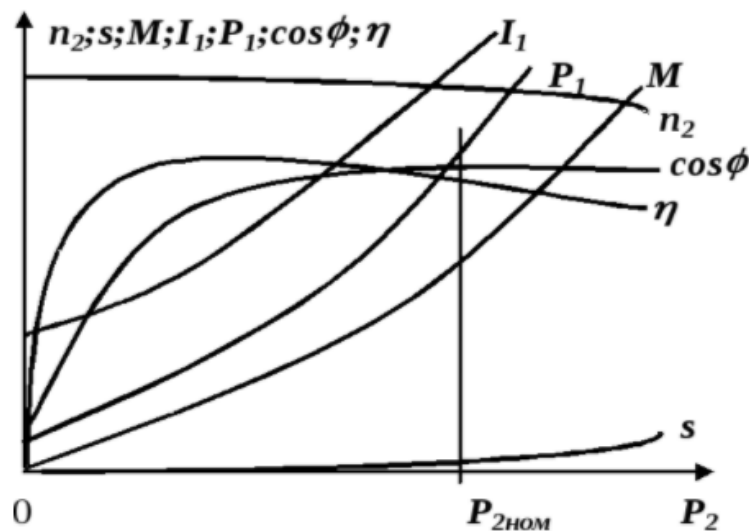


Рисунок 2.1 - Загальний вид робочих характеристик АД

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочим характеристикам $n_2 = f(P_2)$ та $s = f(P_2)$: при усталеному режимі роботи електромагнітний момент АД, M , дорівнює моменту опору, M_o , який складається з постійного за величиною гальмівного моменту холостого ходу та корисного моменту на валу електродвигуна, M_2 . Зі збільшенням навантаження на валу на початку момент опору буде

більшим, ніж електромагнітний момент, при цьому частота обертання зменшується, а ковзання збільшується, а також збільшується величина ЕРС, яка виникає в обмотці ротора, так як вона пропорційна ковзанню. Це призводить до збільшення струму в обмотці ротора, I_2 , й як наслідок, до збільшення електромагнітного моменту. Збільшення ковзання та моменту буде здійснюватись до появи рівності моментів M та M_0 . Таким чином, при збільшенні потужності на валу електродвигуна, P_2 , ковзання, s , збільшується, а частота обертання ротора, p_2 , зменшується. Залежності ковзання та частоти обертання від потужності на валу АД є дещо нелінійними.

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $I_1 = f(P_2)$: характер зміни струму статора, I_1 , зі збільшенням потужності P_2 визначається зміною струму ротора I_2' згідно рівняння $I_1 = I_0 + I_2'$. При холостому ході $I_2' = 0$ та $I_1 = I_0$. Слід відзначити, що струм I_0 є реактивним та створює обертове магнітне поле та внаслідок наявності повітряного зазору є порівняно великим за величиною. При невеликих навантаженнях ковзання є невеликим, струм ротора та активна складова струму статора змінюються практично пропорційно потужності на валу P_2 . При подальшій зміні навантаження виникає збільшення струму статора внаслідок збільшення активної складової струму за рахунок зростання навантаження, а також внаслідок збільшення реактивної складової струму за рахунок збільшення ковзання. Тому то залежність має незначну опуклість в сторону осі абсцис.

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $M_2 = f(P_2)$: так як момент на валу електродвигуна дорівнює $M_2 = \frac{P_2}{\omega_2}$, тому при постійній кутовій швидкості обертання ця залежність мала б лінійний характер та проходила б через початок координат. Але внаслідок збільшення потужності на валу дещо зменшується кутова швидкість електродвигуна, отже залежність має незначну опуклість в сторону осі абсцис.

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $M = f(P_2)$: така залежність визначається співвідношенням згідно формули $M = M_c + M_2$.

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $\eta = f(P_2)$: вид характеристики залежить від співвідношення постійних та змінних втрат в електродвигуні при зміні потужності P_2 . При невеликому навантаженні електричні втрати Δp_{el1} та Δp_{el2} пропорційні квадрату струмів в обмотках статора та ротора та є незначними, при цьому втрати P_0 , які не залежать від навантаження, є основною частиною загальних втрат. Тому при зміні потужності на валу P_2 від 0 до 20...25% від номінальної сумарні втрати збільшуються повільніше, ніж корисна потужність, а ККД збільшується за рахунок збільшення потужності P_2 . Зростання ККД поступово уповільнюється, так як збільшуються електричні втрати в обмотках електродвигуна. При навантаженні 60...80% від номінального ККД сягає максимального значення, а постійні втрати дорівнюють змінним втратам. При подальшому збільшенні потужності P_2 електричні втрати й сумарні втрати збільшуються швидше, ніж корисна потужність, а ККД електродвигуна зменшується.

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $P_1 = f(P_2)$: при зміні навантаження від холостого ходу та вище ККД спочатку значно збільшується, а при подальшому збільшенні навантаження змінюється незначно, а отже залежність на початку має деяку опуклість в сторону осі абсцис, а потім поступово наближається до прямої. При навантаженнях більш, ніж номінальне електричні втрати збільшуються, а ККД – зменшується.

Розглянемо коротке фізичне пояснення робочій характеристиці $\cos\varphi_1 = f(P_2)$: величина $\cos\varphi_1$ АД визначається співвідношенням активної та реактивної потужностей, які споживаються електродвигуном, Реактивна потужність, Q_1 , складається з потужності, яка створює основний магнітний потік, а також з двох потужностей, які пропорційні квадратам струмів статора й ротора, та які створюють магнітні поля розсіювання. При холостому ході реактивна потужність, Q_0 , є значно більшою, ніж активна потужність P_0 , так як остання

витрачається на покриття порівняно невеликих за величиною втрат холостого ходу. Тому при холостому ході коефіцієнт потужності є малим: $\cos\varphi_1 = 0,1 \dots 0,3$.

При збільшенні навантаження активна потужність P_1 збільшується, так як збільшуються P_2 та електричні втрати в обмотках електродвигуна. Реактивна потужність, Q_2 , при незначних навантаженнях залишається практично незмінною. Тому коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$ значно збільшується. При подальшому збільшенні навантаження за рахунок збільшення струмів в обмотках статора та ротора реактивна потужність значно зростає, а збільшення $\cos\varphi_1$ уповільнюється. При номінальному навантаженні $\cos\varphi_1$ буде дорівнювати номінальному $\cos\varphi_n$, а саме, для АД малої та середньої потужності ($1 \dots 100 \text{ кВт}$) $\cos\varphi_n = 0,7 \dots 0,9$, а електродвигунів великою потужності (більш, ніж 100 кВт) $\cos\varphi_n = 0,9 \dots 0,95$.

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці В.2, що наведена в додатку В, записати паспортні дані заданого асинхронного електродвигуна в таблицю 1 звіту до лабораторної роботи.

2. Розшифрувати умовне літерно-цифрове позначення типу заданого електродвигуна. Результати навести в таблицю 2 звіту до лабораторної роботи.

3. Визначити розрахунковим методом:

- номінальні дані АД за паспортними даними, а саме: номінальний струм, I_n , А, номінальне ковзання, S_n , в.о.; ω_n , рад/с; номінальний момент, M_n , Н·м. Результати розрахунків навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи;

- дані з дослідження холостого ходу АД, а саме: синхронна кутова швидкість магнітного поля статора ω_1 , рад/с, момент холостого ходу, M_0 , Н·м, активна складова струму холостого ходу, I_{0a} , А, реактивна складова струму холостого ходу, I_{0p} , А. Результати розрахунків навести в таблиці 4 звіту до лабораторної роботи;

- дані з дослідження короткого замикання, а саме: повний опір короткого замикання, Z_k , Ом, активний опір короткого замикання, R_k , Ом, індуктивний опір

короткого замикання, X_k , Ом. Результати розрахунків навести в таблиці 5 звіту до лабораторної роботи;

- активні опори обмоток статора і ротора при розрахунковій температурі, R_{1p} , Ом; R_2' , Ом.

4. Скласти розрахунковий формуляр для побудови робочих характеристик АД – таблиця 6 звіту до лабораторної роботи.

5. Побудувати робочі характеристики АД з використанням розрахункового формуляру – рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

6. Визначити відсоток розходження розрахункових і паспортних даних наступних величин: I_n , P_n , M_n , η_n , $\cos\varphi_n$. Результати розрахунків навести в таблиці 6.

7. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Паспортні дані асинхронного електродвигуна

Варіант	Тип АД	P_n , кВт	n_n , об/хв.	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	U_{1n} , В	$R_{1(20^\circ C)}$, Ом

Таблиця 2 – Умовне літерно-цифрове позначення типу АД

$$\frac{5A}{1} \frac{X}{2} \frac{X}{3} \frac{X}{4} \frac{X}{5} \frac{X}{6} \Rightarrow \underline{\hspace{10em}}$$
 (тип заданого АД)

Варіант	
Тип АД	
1 літерно-цифрове позначення	
2 цифрове позначення	
3 літерне позначення	
4 літерне позначення	
5 цифрове позначення	
6 літерно-цифрове позначення	

4. Таблиця 3 – Результати розрахунків енергетичних показників і величин, що визначають основні властивості АД за паспортними даними

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Номінальний струм АД	I_n, A	$I_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1n} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n}$	$I_n =$
Номінальне ковзання АД	$s_n, в.о.$	$s_n = \frac{n_{1n} - n_n}{n_{1n}}$	$s_n =$
Номінальна кутова швидкість АД	$\omega_n, рад/с$	$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}$	$\omega_n =$
Номінальний момент АД	$M_n, Н \cdot м$	$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}$	$M_n =$

5. Таблиця 4 – Результати розрахунків даних з досліду холостого ходу

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Синхронна кутова швидкість магнітного поля статора АД	$\omega_1, рад/с$	$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_{1n}}{30}$	$\omega_1 =$
Момент холостого ходу	$M_0, Н \cdot м$	$M_0 = \frac{P_0}{\Omega_1}$	$M_0 =$
Активна складова струму холостого ходу	I_{0a}, A	$I_{0a} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1\phi n}}$	$I_{0a} =$
Реактивна складова струму холостого ходу	I_{0p}, A	$I_{0p} = \sqrt{I_0^2 - I_{0a}^2}$	$I_{0p} =$

6. Таблиця 5 – Результати розрахунків даних з досліду короткого замикання

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Фазна напруга короткого замикання	$U_{1\kappa\phi}, B$	$U_{1\kappa\phi} = \frac{U_{1\kappa\lambda}}{\sqrt{3}}$	$U_{1\kappa\phi} =$
Повний опір короткого замикання	$Z_{\kappa}, Ом$	$Z_{\kappa} = \frac{U_{1\kappa\phi}}{I_H}$	$Z_{\kappa} =$
Активний опір короткого замикання	$R_{\kappa}, Ом$	$R_{\kappa} = \frac{P_{\kappa} \cdot 10^3}{3 \cdot I_H^2}$	$R_{\kappa} =$
Індуктивний опір короткого замикання	$X_{\kappa}, Ом$	$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}$	$X_{\kappa} =$

7. Результати розрахунку:

- активного опору фази обмотки статора АД при розрахунковій температурі

$$R_{1tp} = R_{1(20^{\circ}C)} \frac{235 + t_p}{235 + 20}; \quad (1)$$

$$R_{1tp} =$$

де t_p – розрахункова температура. Для АД з висотою осі обертання менша або дорівнює $\leq 132 \text{ мм}$ $t_p = 75^{\circ}C$; для АД з висотою осі обертання більша або дорівнює 160 мм $t_p = 115^{\circ}C$.

- приведений активний опір обмотки ротора АД

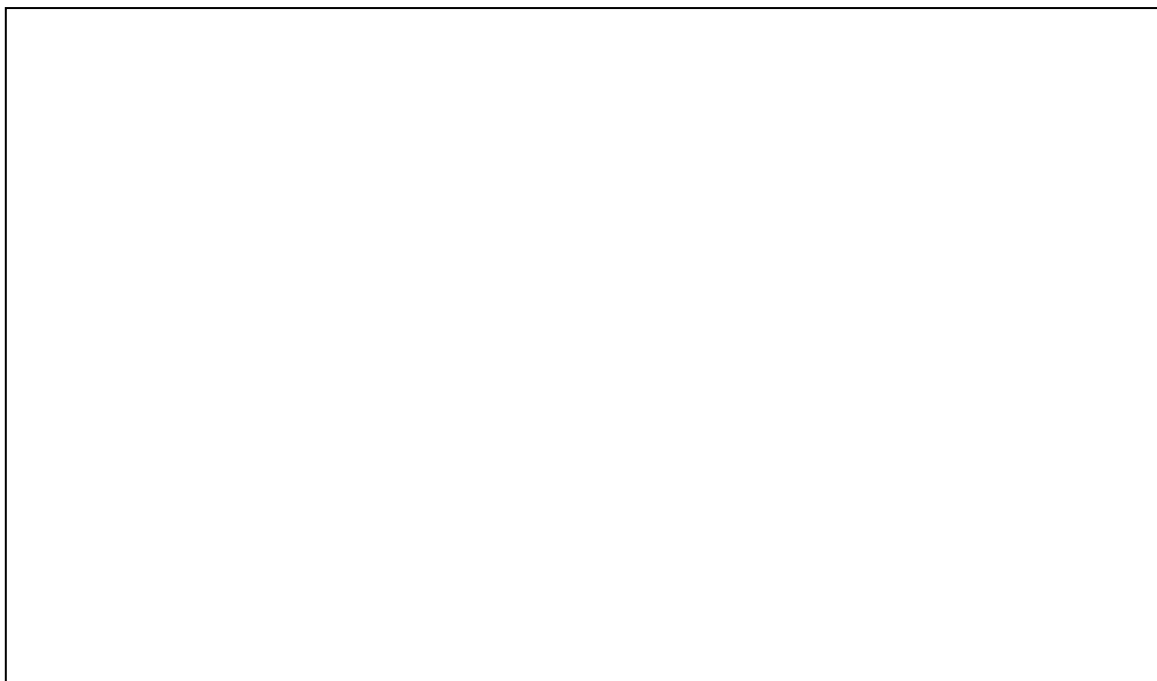
$$R_2' = \frac{R_k - R_{1t}}{C_1}, \quad (2)$$

де C_1 – поправочний коефіцієнт, $C_1 = 1,04$;

$$R_2' =$$

8. Таблица 6 – Розрахунковий формуляр для побудови робочих характеристик

№ формули	Розрахункові формули	Од. вим.	Ковзання					
			0,2·s _н	0,4·s _н	0,6·s _н	0,8·s _н	s _н	1,4·s _н
1	$R_{ks} = C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot (R_2'/s)$	Ом						
2	$Z_{ks} = \sqrt{R_{ks}^2 + X_k^2}$	Ом						
3	$\cos \varphi_2 = R_{ks} / Z_{ks}$	в.о.						
4	$\sin \varphi_2 = X_k / Z_{ks}$	в.о.						
5	$I_2' = (C_1 \cdot U_{1нф}) / Z_{ks}$	А						
6	$I_{2a}' = (1/C_1) \cdot I_2' \cdot \cos \varphi_2$	А						
7	$I_{2p}' = (1/C_1) \cdot I_2' \cdot \sin \varphi_2$	А						
8	$I_{1a} = I_{oa} + I_{2a}'$	А						
9	$I_{1p} = I_{op} + I_{2p}'$	А						
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А						
11	$\cos \varphi_1 = I_{1a} / I_1$	в.о.						
12	$P_1 = 3 \cdot U_{1нф} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт						
13	$\Delta p_{e1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \cdot 10^{-3}$	кВт						
14	$\Delta p_{e2} = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot R_2' \cdot 10^{-3}$	кВт						
15	$\Delta p_o = 0,005 \cdot P_{1н}$	кВт						
16	$\Sigma P = P_o + \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} + \Delta p_o$	кВт						
17	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт						
18	$\eta = P_2 / P_1$	в.о.						
19	$\omega = \omega_1 \cdot (1 - s)$	рад/с						
20	$M_2 = P_2 \cdot 10^3 / \omega$	Н·м						
21	$M = M_o + M_2$	Н·м						



9. Рисунок 1 - Робочі характеристики АД

10. Таблиця 6 – Порівняння розрахункових та паспортних даних АД

Величина	Паспортні дані	Розрахункові дані	Відсоток розбіжності
$P_n, \text{кВт}$			
$I_n, \text{А}$			
$M_n, \text{Н·м}$			
$\eta_n, \%$			
$\cos\varphi_n, \text{в.о.}$			

11. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Лабораторна робота
ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ І ПОБУДОВИ
МОМЕНТНОЇ ТА МЕХАНІЧНОЇ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО
ЕЛЕКТРОДВИГУНА З К.З. РОТОРОМ

Мета роботи:

Практичне застосування методики розрахунку і побудови моментної і механічної характеристик асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором за паспортними даними.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- означення механічної та моментної характеристик асинхронного електродвигуна (АД) з короткозамкненим (к.з.) ротором;
- загальний вид механічної та моментної характеристик АД з к.з. ротором;
- коротке фізичне пояснення механічної характеристики та властивостей АД з к.з. ротором;
- коротке фізичне пояснення моментної характеристики та властивостей АД з к.з. ротором.

Ознайомитись з:

- методикою розрахунку та побудови механічної характеристики АД з к.з. ротором;
- методикою розрахунку та побудови моментної характеристики АД з к.з. ротором [1, с.196-201, 2, с. 428-433, 3, с. 265-279; 4, с.257-264].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- таблиці 1...4, рисунок 1 – Моментна характеристика АД; рисунок 2 - Механічна характеристика АД.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 10».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Що таке механічна характеристика АД? Наведіть загальний вид механічної характеристики АД.
2. Надайте коротке фізичне пояснення механічній характеристиці електродвигуна.
3. Що таке моментна характеристика АД? Наведіть загальний вид моментної характеристики АД.
4. Надайте коротке фізичне пояснення моментної характеристики електродвигуна.
5. Опишіть методику розрахунку та побудови механічної та моментної характеристик електродвигуна.

1.3 Рекомендована література

1. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори: навчальний посібник, за ред. В. І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 452 с.
2. Назарьян Г. Н. Электрические машины: Учебное пособие для вузов. – Мелитополь, Люкс, 2011. – 827 с.
3. Куценко Ю. М., Яковлев В. Ф., Смуригин В. М., Ковальов О. В., Вужицкий А. В. Электричні машини і апарати: навчальний посібник. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
4. Загірняк М. В., Невзілін Б. І. Электричні машини: підручник. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К.: Знання, 2009. – 399 с.

2. Основні теоретичні відомості

Механічна характеристика АД – це залежність кутової швидкості вала електродвигуна від електромагнітного обертового моменту: $\omega = f(M_{\text{дв}})$ при $U_{1н} = \text{const}$ та $f_{1н} = \text{const}$.

Загальний вид механічної характеристики АД наведений на рисунку 2.1.

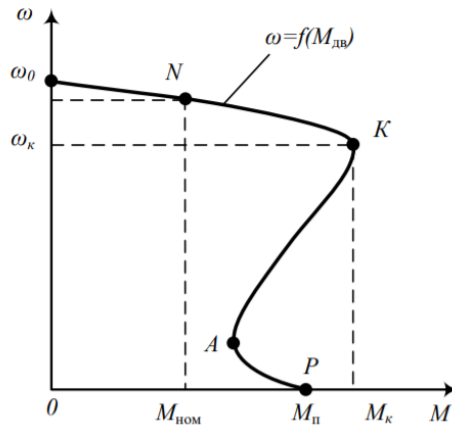


Рисунок 2.1 - Загальний вид механічної характеристики АД

Ділянка механічної характеристики від точки Р до точки К відповідає нестійкій роботі АД, а ділянка від точки К до точки ω_0 – стійка робота електродвигуна.

Розглянемо коротке фізичне пояснення механічної характеристики електродвигуна. Механічна характеристика електродвигуна описується наявністю п'яти характерних точок:

- точка Р: точка пуску – «пусковий режим»: $\omega = 0$; $s_n = 1$; $M_{\text{дв}} = M_n$;
- точка А: точка мінімального моменту при пуску електродвигуна: $\omega_{\text{min}} = \omega_1 \cdot (1 - s_{\text{min}})$; $s = s_{\text{min}} = 0.8 \dots 0.85$; $M_{\text{дв}} = M_{\text{min}}$;
- точка К: точка критичної роботи: $\omega_k = \omega_1 \cdot (1 - s_k)$; $s = s_k$; $M_{\text{дв}} = M_k$;
- точка N: точка номінальної роботи: $\omega_n = \omega_1 \cdot (1 - s_n)$; $s = s_n$; $M = M_n$;
- точка ω_0 : точка ідеального неробочий (холостий) хід: $\omega = \omega_0$; $s = 0$; $M_{\text{дв}} = 0$.

При цьому властивості АД характеризуються кратностями:

- пускового моменту за виразом

$$\mu_n = \frac{M_n}{M_n}; \quad (1)$$

- максимального моменту за виразом

$$\mu_k = \frac{M_k}{M_n}; \quad (2)$$

- мінімального моменту за виразом

$$\mu_{min} = \frac{M_{min}}{M_n}. \quad (3)$$

Значення μ_n , μ_k , μ_{min} наведені в паспортних даних електродвигуна, так для електродвигунів загального призначення зазначені кратності знаходяться в діапазоні: $\mu_n = 1 \dots 2$; $\mu_k = 1,7 \dots 3,0$; $\mu_{min} = 0,8 \dots 1,5$.

Відомо, що стійка робота АД забезпечується при умові, коли момент опору на валу електродвигуна, M_o , дорівнює електромагнітному моменту, M , згідно виразу

$$M_o = M_{xx} + M_2 = M < M_k, \quad (4)$$

де M_{xx} – момент холостого ходу, $H \cdot m$;

M_2 - корисний момент на валу електродвигуна, $H \cdot m$.

Тому, щоб робота АД була надійною та короткочасні перевантаження не викликали зупинок («перекидання») електродвигуна необхідно, щоб він мав достатню перевантажувальну здатність. **Перевантажувальна здатність** електродвигуна – це відношення максимального моменту, M_k , до номінального моменту, M_n , тобто перевантажувальна здатність визначається кратністю максимального моменту, $\mu_k = M_k / M_n$. Слід звернути увагу на таку обставину, що робота АД при ковзанні $s < s_k$, тобто на робочій ділянці механічної характеристики, є економічною роботою, так як характеризується наявністю малого значення ковзання, малим втратам в обмотці ротора та магнітним втратам в осерді статора. При роботі АД в діапазоні великих значень ковзання магнітні та електричні втрати значно збільшуються, теплота, яка виділяється, призводить до перегріву обмоток та осердя статора й ротора, як наслідок, до виходу електродвигуна з ладу.

Моментна характеристика електродвигуна – це залежність електромагнітного обертового моменту від величини ковзання $M=f(s)$ при $U_{1H}=const$ й $f_{1H}=const$. Загальний вид моментної характеристики АД наведений на рисунку 2.2.

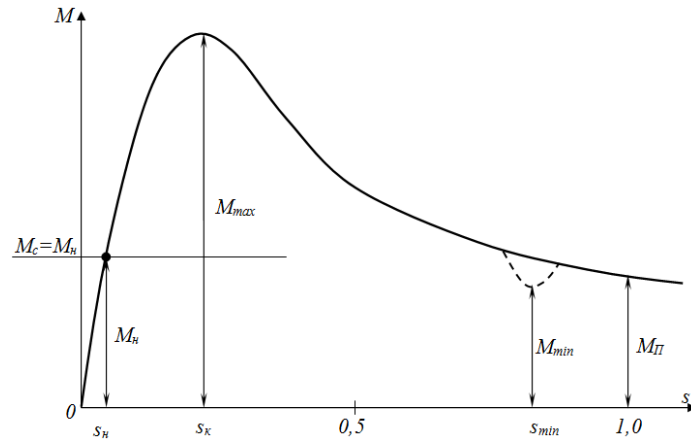


Рисунок 2.2 - Загальний вид моментної характеристики АД

Розглянемо коротке фізичне пояснення моментної характеристики електродвигуна. На моментній характеристиці показані чотири найбільш важливі точки режиму електродвигуна, а саме:

- при підключенні АД до мережі живлення ротор є нерухомим ($n_2=0$), а ковзання $s=1$, при цьому створюється початковий пусковий момент M_n . Під дією такого моменту починається обертання ротора, при цьому ковзання знижується, а момент обертання зростає;

- при критичному ковзанні, s_k , момент сягає максимального значення M_{max} ;

- з подальшим зростанням частоти обертання ротора ковзання і момент зменшуються до тих пір, поки момент електродвигуна не стане дорівнювати моменту опору навантаження ($M=M_o$), що відповідає сталому режиму роботи електродвигуна. При номінальному навантаженні на валу ковзання й момент будуть номінальними ($M_n; s_n$);

- нормальна стійка робота електродвигуна забезпечується лише на прямолінійній частині характеристики при ковзаннях менше, ніж критичне значення ковзання ($s < s_k$). На цій ділянці зміна навантаження на валу електродвигуна

супроводжується відповідною зміною електромагнітного моменту від $M=0$ до $M=M_k$;

- робота АД на ділянці характеристики при моменті навантаження $M_o > M_k$ і ковзанні $s \geq s_k$ стає нестійкою. З характеристики видно, що в цьому випадку навіть незначне збільшення моменту навантаження $M_o > M_k$ призводить до збільшення ковзання s і до зменшення електромагнітного моменту аж до зупинки внаслідок перевантаження. На практиці зупинка електродвигуна при надмірному перевантаженні ($M_o > M_k$) отримала назву «перекидання електродвигуна». При цьому робота АД при $n_2=0$ і $s=1$ відповідає режиму сталого короткого замикання електродвигуна із струмом короткого замикання I_k , який перевищує номінальний струм в 5...7 разів.

Таким чином, асинхронний електродвигун має границю перевантаження, яка визначається величиною максимального електромагнітного моменту M_k .

В сучасних АД, що відрізняються високим використанням активних матеріалів (електротехнічної сталі і обмотувального проводу), в кривій моменту є «провал» поблизу пускової точки ($s=1$) при ковзанні s_{min} і мінімальному моменті M_{min} (штрихова частина характеристики на рисунку 2.2), який обумовлений впливом моментів від полів вищих гармонік.

Для АД базового виконання потужністю до 100 кВт значення ковзання знаходиться в таких діапазонах:

$$s_n = 0,02 - 0,06 (2 - 6\%); \quad s_k = 0,07 - 0,2 (7 - 20\%); \quad s_{min} = 0,8 - 0,9 (80 - 90\%).$$

Методика розрахунку та побудови механічної та моментної характеристик електродвигуна.

На практиці існує дві методики розрахунку таких характеристик в залежності від вихідних даних, а саме:

- методика за відомими параметрами схеми заміщення АД;
- методика за каталожними (паспортними) даними АД.

Розглянемо методику розрахунку та побудови механічної та моментної характеристик електродвигуна за каталожними (паспортними) даними АД.

Розрахунок здійснюється за рівнянням відносного моменту згідно формули Клосса

$$M = \frac{2M_{\kappa}(1 + a \cdot s_{\kappa})}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2a \cdot s_{\kappa}}, \quad (5)$$

де M_{κ} – критичний (максимальний) момент, який розвиває електродвигун, $H \cdot m$;

$a = \frac{R_1}{R_2}$ – коефіцієнт відношення активного опору обмотки статора до

приведеного активного опору обмотки ротора, $в.о.$;

s – поточне ковзання, $в.о.$;

s_{κ} – критичне ковзання, $в.о.$

Враховуючи, що $R_1 \approx R_2$, тому $a = 1$, отже рівняння має вигляд

$$M = \frac{2M_{\kappa}(1 + s_{\kappa})}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s} + 2s_{\kappa}}. \quad (6)$$

В реальних умовах активний опір статора R_1 незначний і ним з достатньою точністю для практичних розрахунків можна нехтувати, а рівняння Клосса буде мати вигляд

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{s}{s_{\kappa}} + \frac{s_{\kappa}}{s}}. \quad (7)$$

Значення μ_n , μ_{κ} , μ_{min} наведені в паспортних даних електродвигуна, тому після визначення за паспортними даними значення номінального моменту електродвигуна необхідно визначити значення максимального моменту через відповідну кратність

$$M_{\kappa} = \mu_{\kappa} \cdot M_n. \quad (8)$$

Критичне ковзання електродвигуна визначається за виразом

$$s_{\kappa} = \frac{s_n \left(\mu_{max} + \sqrt{\mu_{max}^2 + 2s_n (\mu_{max} - 1) - 1} \right)}{1 - 2s_n (\mu_{max} - 1)}. \quad (9)$$

При розрахунках механічної та моментної характеристик слід приймати такі значення ковзання, $s = 0; s_n; 0,1; s_k; 0,4; 0,6; 0,8$ та $1,0$.

Результати розрахунків наводяться в таблиці.

Таблиця – Результати розрахунків

Розраховані величини	Ковзання, в.о.								
	0	$s_n =$	0,1	$s_k =$	0,4	0,6	$s_{min} =$	0,8	1
$(1 - s), \text{ в.о.}$	1								0
$\omega = \omega_1 \cdot (1 - s),$ рад/с	$\omega_1 =$	$\omega_n =$		$\omega_k =$			$\omega_{min} =$		
$M, \text{ Нм}$	0	$M_n =$		$M_k =$			$M_{min} =$		$M_n =$

За даними таблиці на координатних площинах будуються механічна та моментна характеристики АД. За результатами аналітичних розрахунків визначається перевантажувальна здатність електродвигуна, яка слід порівняти з наведеною в каталожним (паспортних) даних. Слід відзначити, що після побудови характеристик необхідно здійснити корекцію характеристик в точках пускового та мінімального моментів з використанням їх відповідних кратностей, μ_n та μ_{min} , які наведені каталожним (паспортних) даних.

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці В.2, що наведена в додатку В, записати паспортні дані заданого асинхронного електродвигуна в таблицю 1 звіту до лабораторної роботи.

2. Розшифрувати умовне літерно-цифрове позначення типу заданого електродвигуна. Результати навести в таблицю 2 звіту до лабораторної роботи.

3. Визначити розрахунковим методом: синхронну частоту обертання магнітного поля статора АД, $n_1, \text{ об./хв.}$; номінальну кутову швидкість АД, $\omega_n, \text{ рад/с.}$; номінальне ковзання АД, $s_n, \text{ в.о.}$; номінальний момент АД, $M_n, \text{ Нм}$; критичне ковзання АД, $s_k, \text{ в.о.}$; синхронну та критичну кутові швидкості АД, $\omega_1, \text{ рад/с.}$ та $\omega_k, \text{ рад/с.}$, відповідно Результати розрахунків навести в таблиці 3 звіту до лабораторної роботи;

4. Розрахувати згідно рівняння відносного моменту АД (за формулою Клосса (див.формулу (6)) при коефіцієнті відношення активного опору обмотки статора до приведенного активного опору обмотки ротора, $\alpha = 1$, величини моментів при фіксованих значеннях ковзання, $s = 0; s_n; 0,1; s_k; 0,4; 0,6; s_{min}; 1,0$ в.о. Результати розрахунків навести в розрахунковому формулярі – таблиця 4 звіту до лабораторної роботи.

5. За результатами розрахунків побудувати в масштабах моментну характеристику АД – рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

6. За результатами розрахунків побудувати в масштабах механічну характеристику АД – рисунок 2 звіту до лабораторної роботи.

4. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 - Паспортні дані асинхронного електродвигуна

Варіант	Тип АД	P_n , кВт	n_n , об/хв.	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	U_{1n} , В	$R_{1(20^\circ C)}$, Ом
		I_0 , А	P_0 , кВт	P_k , кВт	$U_{кл}$, В	μ_{max} , в.о.	

3. Таблиця 2 – Умовне літерно-цифрове позначення типу АД

$$\begin{array}{cccccc} 5 & A & X & X & X & X \\ \hline 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array} \Rightarrow \underline{\hspace{10cm}}$$
 (тип заданого АД)

Варіант	
Тип АД	
1 літерно-цифрове позначення	
2 цифрове позначення	
3 літерне позначення	
4 літерне позначення	
5 цифрове позначення	
6 літерно-цифрове позначення	

4. Таблиця 3 – Результати розрахунків

Найменування величини	Літерне позначення, одиниця вимірювання величини	Вихідна розрахункова формула	Значення
Синхронна частота обертання магнітного поля статора АД	$n_1, об/хв.$	$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}$	$n_1 =$
Номінальна кутова швидкість АД	$\omega_n, рад/с$	$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}$	$\omega_n =$
Номінальне ковзання АД	$s_n, в.о.$	$s_n = \frac{n_{1n} - n_n}{n_{1n}}$	$s_n =$
Номінальний момент АД	$M_n, Н \cdot м$	$M_n = \frac{P_n \cdot 10^3}{\omega_n}$	$M_n =$
Синхронна кутова швидкість АД	$\omega_1, рад/с$	$\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$	$\omega_1 =$
Критичне ковзання АД,	$s_k, в.о.$	$s_k = \frac{s_n \left(\mu_{max} + \sqrt{\mu_{max}^2 + 2s_n (\mu_{max} - 1) - 1} \right)}{1 - 2s_n (\mu_{max} - 1)}$	$s_k =$
Критична кутова швидкість АД	$\omega_k, рад/с$	$\omega_k = \omega_1 (1 - s_k)$	$\omega_k =$

5. Таблиця 4 – Розрахунковий формуляр для побудови моментної та механічної характеристик АД за формулою Клосса

Розраховані величини	Ковзання, в.о.							
	0	$s_H =$	0,1	$s_K =$	0,4	0,6	$s_{min} =$	1
$(1 - s)$, в.о.	1							0
$\omega = \omega_1 \cdot (1 - s)$, рад/с	$\omega_1 =$	$\omega_H =$		$\omega_K =$			$\omega_{min} =$	
M , Н·м	0	$M_H =$		$M_K =$			$M_{min} =$	$M_n =$

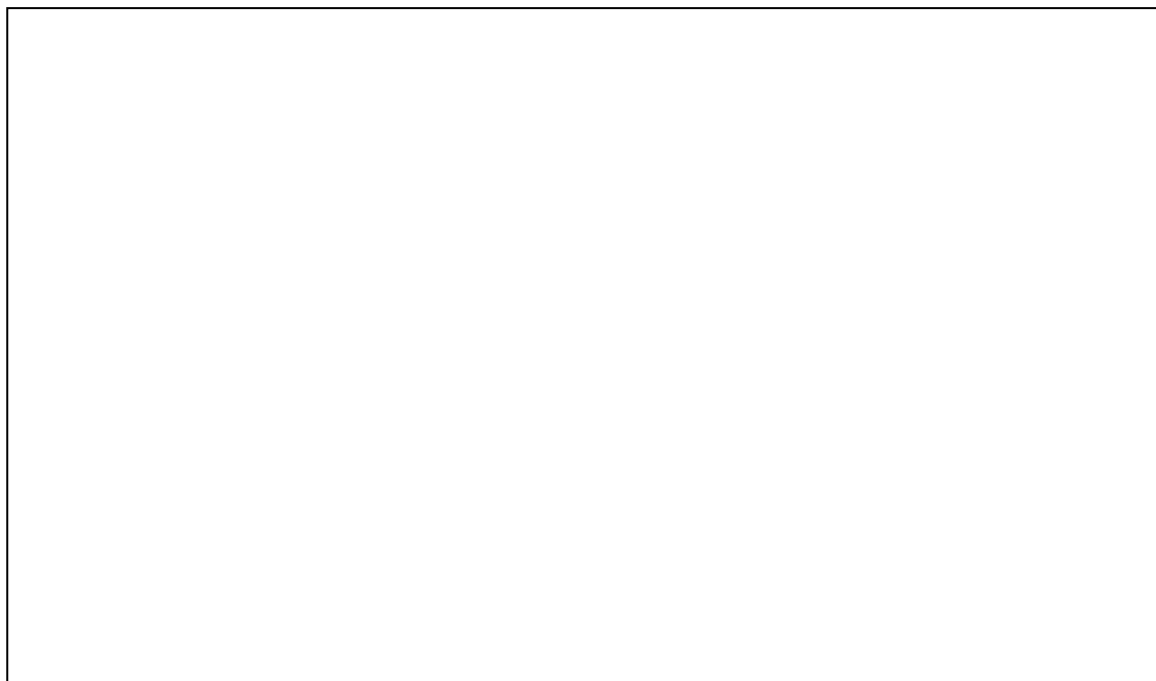
Примітка до таблиці 4:

Уточнена формула Клосса при коефіцієнті відношення активного опору обмотки статора до приведенного активного опору обмотки ротора, $\alpha = 1$, має вигляд

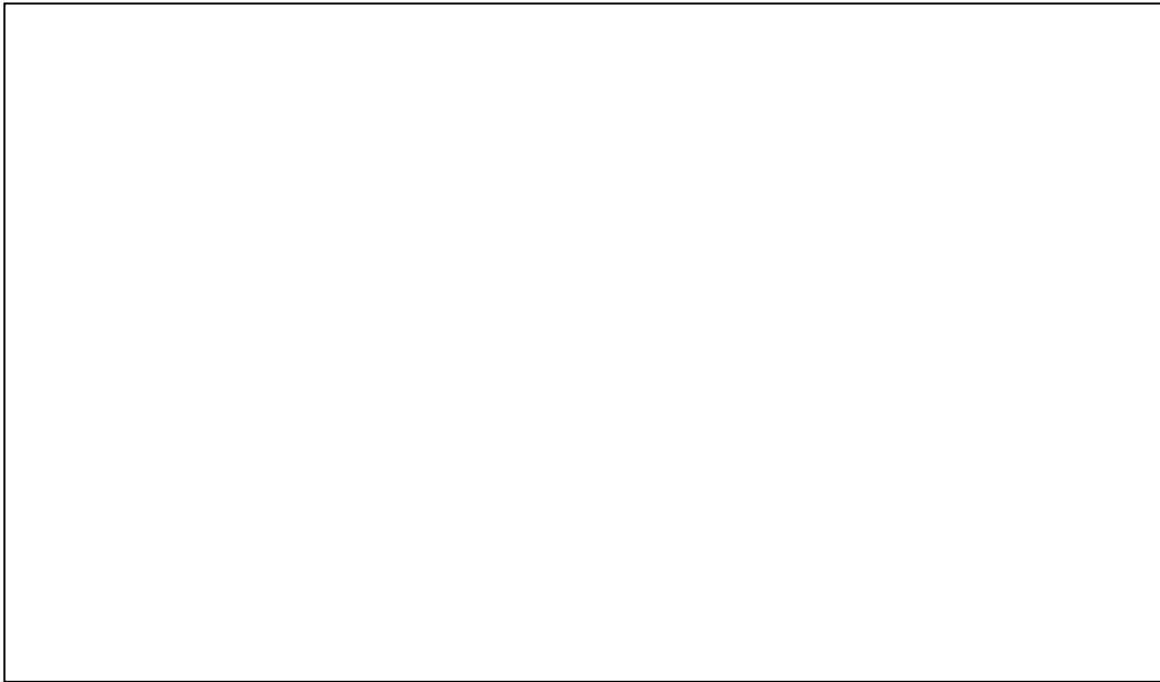
$$M = \frac{2M_K (1 + \alpha \cdot s_K)}{\frac{s}{s_K} + \frac{s_K}{s} + 2\alpha \cdot s_K},$$

де M_K - максимальний момент асинхронного електродвигуна, Н·м.

$$M_K = M_n \cdot \mu_{max}.$$



6. Рисунок 1 – Моментна характеристика АД.



7. Рисунок 2 – Механічна характеристика АД.

8. Висновок щодо отриманих результатів та їх детальний аналіз.

Лабораторна робота
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛІЗОВАНОГО ДЖЕРЕЛА
ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при розрахунку малопотужного стабілізованого джерела живлення постійної напруги.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- призначення, принцип роботи й основні параметри однофазних випрямлячів;
- методику розрахунку однофазних випрямлячів;
- призначення, принцип роботи й основні параметри згладжувальних фільтрів;
- методику розрахунку згладжувальних фільтрів;
- призначення, принцип роботи й основні параметри компенсаційних стабілізаторів постійної напруги;
- методику розрахунку компенсаційних стабілізаторів постійної напруги.

Ознайомитись з:

- теоретичним матеріалом за рекомендованою літературою [1, с. 176-193; 2, с. 303-320; 3, с. 42-61].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- рисунок 1 - Принципова електрична схема малопотужного стабілізованого джерела живлення постійної напруги; рисунок 2 – Схема однофазного мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження; рисунок 3 - Схема LC- фільтру; рисунок 4 - Схема RC- фільтру; рисунок 5 - Схема компенсаційного стабілізатора напруги і пояснити призначення елементів стабілізатора;
- результати розрахунку однофазного мостового випрямляча;
- результати розрахунку згладжувальних фільтрів;

- результати розрахунку компенсаційного стабілізатора постійної напруги;
- аналіз отриманих результатів та висновки.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 11».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Поясніть призначення випрямлячів.
2. Охарактеризуйте класифікацію однофазних випрямлячів?
3. Поясніть принцип дії мостового випрямляча за допомогою часових діаграм напруг.
4. За якими параметрами здійснюється вибір випрямних діодів для мостового випрямляча?
5. За якими аналітичними виразами визначаються опір навантаження випрямляча, опір обмоток трансформатора, прямий опір діода та активний опір фази випрямляча?
6. Як здійснити перевірку правильності вибору діодів?
7. За яким аналітичним виразом визначається ємність конденсатора на виході випрямляча?
8. Яке призначення згладжувальних фільтрів та як вони класифікуються?
9. Назвіть основні параметри згладжувальних фільтрів.
10. Поясніть принцип роботи LC - фільтру.
11. За якими аналітичними виразами визначаються параметри LC - фільтру?
12. Поясніть принцип роботи RC - фільтру.
13. За якими аналітичними виразами визначаються параметри RC - фільтру?
14. Яке призначення стабілізаторів напруги та як вони класифікуються?
15. Яке призначення елементів схеми компенсаційного стабілізатора?
16. Опишіть принцип роботи компенсаційного стабілізатора.

17. Від чого залежить кількість транзисторів, що входять до регулюючого елемента стабілізатора та за якими параметрами здійснюється вибір транзисторів?

18. За якими параметрами здійснюється вибір стабілітрона та резисторів?

1.3 Рекомендована література

1. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник / С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.

2. Квітка С.О. Електроніка та мікросхемотехніка: навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна ; За ред. проф. В.Ф. Яковлева. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.

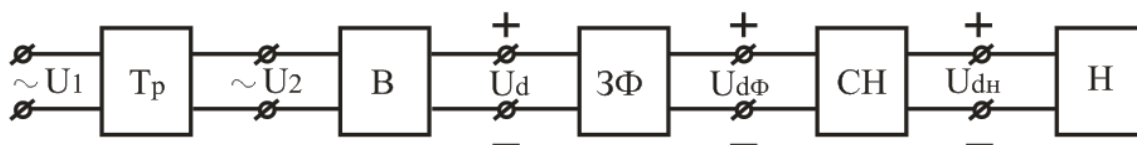
3. Електроніка та мікросхемотехніка: посібник для виконання лабораторних і практичних занять / С.О. Квітка, Ю.М. Федюшко, Н.Г. Косуліна, С.О. Мороз. – Х.: ФОП Мезіна В.В., 2017. – 244 с.

4. Терещук Р.М., Терещук К.М., Седов С.А. Полупроводниковые приемно-усилительные устройства: Справочник радиолюбителя / Р.М. Терещук, К.М. Терещук, С.А. Седов. – Киев: Наук. думка, 1987. – 800 с.

2. Основні теоретичні відомості

При малій потужності навантаження задачу перетворення електричної енергії змінного струму в постійний струм вирішують за допомогою однофазних випрямлячів, які живляться від однофазної мережі змінного струму.

Структурна схема системи перетворення електричної енергії з однофазним випрямлячем наведена на рисунку 2.1.



ТР – трансформатор; В – випрямляч; ЗФ – згладжуючий фільтр;

СН – стабілізатор напруги; Н – навантаження

Рисунок 2.1 – Структурна схема малопотужного джерела живлення

Основою її є випрямляч (В) на одному або декількох діодах, які з'єднані за певною схемою. Функція трансформатора (ТР) – це підвищення або зниження вторинної напруги, U_2 , при заданій первинній напрузі, U_1 , з метою отримання необхідної величини постійної напруги на виході. Для зменшення пульсації випрямленої напруги до виходу випрямляча підключається згладжуючий фільтр (ЗФ). Між згладжуючим фільтром та навантаженням (Н) під'єднують стабілізатор напруги (СН), що забезпечує підтримання з необхідною точністю необхідної величини постійної напруги на навантаженні в умовах зміни напруги мережі живлення і струму навантаження.

Випрямляч – це пристрій, який призначений для перетворення енергії джерела змінного струму в постійний струм. Схема однофазного мостового випрямляча містить трансформатор з однією вторинною обмоткою і випрямний міст з чотирьох діодів $VD1 \dots VD4$. Діоди $VD1, VD3$ відкриті на інтервалі $0 - T/2$ при напівхвилі напруги u_2 позитивної полярності (показана без дужок), яка створена під дією напруги u_1 . Відкриті діоди $VD1, VD3$ забезпечують зв'язок вторинної обмотки трансформатора з навантаженням, створюючи на ній напругу u_H тієї ж полярності, що й напруга u_2 .

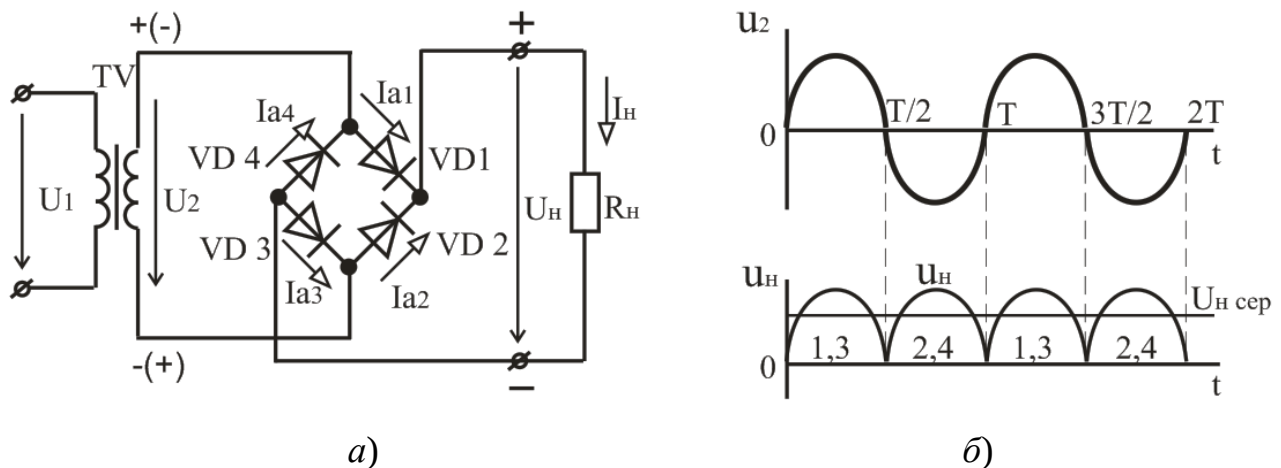


Рисунок 2.2 – Схема однофазного мостового випрямляча (а) і його часові діаграми напруг (б)

За наявності напівхвилі напруги u_1 негативної полярності на інтервалі $T/2 - T$ полярність напруги зворотна. Під її дією відкриті діоди $VD2, VD4$, що

підключають напругу u_2 до навантаження з тією ж полярністю, що й на попередньому інтервалі.

Розглянемо послідовність розрахунку мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження – рисунок 2.3.

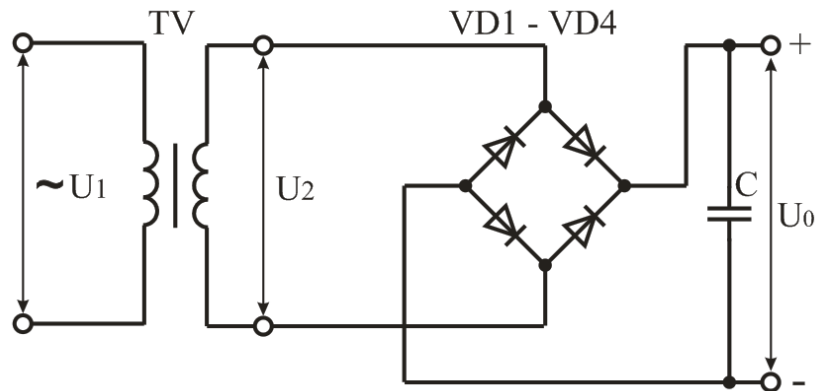


Рисунок 2.3 – Схема мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження

1. Визначення зворотної напруги на діодах за виразом

$$U_{зв} = 1,4 \cdot U_{2H} \approx 1,5 \cdot U_H, \quad (1)$$

де U_H – випрямлена напруга, В.

2. Визначення середнього випрямленого струму за виразом

$$I_{сеп} = \frac{I_H}{2}, \quad (2)$$

де I_H – випрямлений струм, А.

3. Визначення амплітуди струму через діоди за виразом

$$I_m = 0,5 \cdot F \cdot I_H \approx 3,5 \cdot I_H; \quad (3)$$

4. За отриманими даними $U_{зв}$, $I_{сеп}$, I_m обираються випрямні діоди з параметрами: $I_{ПР\ MAX}$, $U_{зв\ MAX}$, $U_{ПР}$.

5. Визначення опору навантаження випрямляча за виразом

$$R_H = \frac{U_H}{I_H}. \quad (4)$$

6. Визначення опору обмоток трансформатора за виразами:

- для випрямлячів потужністю 10...100 Вт

$$r_{TP} = (0,05...0,08) \cdot R_H; \quad (5)$$

- для випрямлячів потужністю до 10 Вт

$$r_{TP} = (0,07...0,1) \cdot R_H. \quad (6)$$

7. Визначення прямого опору діода за виразом

$$r_{IP} \approx \frac{U_{IP}}{3I_{CEP}}; \quad (7)$$

8. Визначення активного опору фази випрямляча за виразом

$$r = r_{TP} + 2r_{IP}; \quad (8)$$

9. Визначення допоміжних коефіцієнтів A , B , D , F , H за виразом (9) та за графічними залежностями [4], які наведені в додатку Г

$$A = 1,6 \frac{r}{R_H}; \quad (9)$$

В залежності від значення допоміжного коефіцієнту A визначення допоміжних коефіцієнтів B , D , F , H здійснюється графічним методом [4]

$$B = \text{_____}; D = \text{_____}; F = \text{_____}; H = \text{_____} \text{ Ом} \cdot \text{мкФ}.$$

10. Перевірка правильності вибору випрямних діодів за виразами

- напруга на вторинній обмотці трансформатора (в режимі холостого ходу)

$$U_{2H} = B \cdot U_H; \quad (10)$$

- зворотна напруга на діодах

$$U_{3B} = 1,4 \cdot U_{2H}; \quad (11)$$

- амплітуда струму через діоди

$$I_m = 0,5 \cdot F \cdot I_H. \quad (12)$$

Висновок: якщо розрахункові дані не перевищують допустимих значень для вибраних діодів, то діоди вибрані вірно. У протилежному випадку необхідно вибрати інші діоди і виконати розрахунок спочатку.

11. Визначення діючого значення струму вторинної обмотки трансформатора за виразом

$$I_2 = \frac{D \cdot I_H}{\sqrt{2}}. \quad (13)$$

12. Визначення ємності конденсатора на виході випрямляча за виразом

$$C = \frac{H}{r \cdot K_{\text{ПО}}}, \quad (14)$$

де $K_{\text{ПО}}$ – коефіцієнт пульсацій напруги на вході фільтру.

13. За [4] обирається тип і приймається номінальне значення ємності конденсатора C .

Приклад розрахунку мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження

Вихідні дані для розрахунку:

- випрямлена напруга, $U_H = 20 \text{ В}$;
- випрямлений струм, $I_H = 0,3 \text{ А}$;
- коефіцієнт пульсацій напруги на вході фільтру, $K_{\text{ПО}} = 0,1$.

Результати розрахунків:

1. Визначення зворотної напруги на діодах за виразом (1)

$$U_{3B} = 1,4 \cdot U_{2H} \approx 1,5 \cdot U_H;$$

$$U_{3B} = 1,5 \cdot 20 = 30 \text{ В}.$$

2. Визначення середнього випрямленого струму за виразом (2)

$$I_{\text{СЕР}} = \frac{I_H}{2};$$

$$I_{\text{СЕР}} = \frac{0,3}{2} = 0,15 \text{ А}.$$

3. Визначення амплітуди струму через діоди за виразом (3)

$$I_m = 3,5 \cdot I_H = 1,05 \text{ А};$$

$$I_m = 3,5 \cdot 0,3 = 1,05 \text{ А}.$$

4. За отриманими даними U_{3B} , $I_{\text{СЕР}}$, I_m обираються діоди: тип КД208А з параметрами: $I_{\text{ПР МАХ}} = 1,5 \text{ А}$; $U_{3B \text{ МАХ}} = 100 \text{ В}$; $U_{\text{ПР}} = 1 \text{ В}$ [4].

5. Визначення опору навантаження випрямляча за виразом (4)

$$R_H = \frac{U_H}{I_H};$$

$$R_H = \frac{20}{0,3} = 66,7 \text{ Ом}.$$

6. Визначення опору обмоток трансформатора для випрямлячів потужністю 10...100 Вт за виразом (5)

$$r_{TP} = (0,05...0,08) \cdot R_H;$$

$$r_{TP} = 0,08 \cdot 66,7 = 5,33 \text{ Ом.}$$

7. Визначення прямого опору діода за виразом (7)

$$r_{PP} \approx \frac{U_{PP}}{3I_{CEP}};$$

$$r_{PP} \approx \frac{1}{3 \cdot 0,15} = 2,22 \text{ Ом.}$$

8. Визначення активного опору фази випрямляча за виразом (8)

$$r = r_{TP} + 2 \cdot r_{PP};$$

$$r = 5,33 + 2 \cdot 2,22 = 9,77 \text{ Ом.}$$

9. Визначення допоміжних коефіцієнтів A , B , D , F , H за виразом (9) та за графічними залежностями, які наведені в [4] та в додатку Г:

$$A = 1,6 \frac{r}{R_H};$$

$$A = 1,6 \cdot \frac{9,77}{66,7} = 0,23,$$

а в залежності від знайденого значення $A = 0,23$ визначені допоміжні коефіцієнти B , D , F , H , а саме:

$$B = 1,0; D = 2,25; F = 6; H = 400 \text{ Ом} \cdot \text{мкФ.}$$

10. Перевірка правильності вибору випрямних діодів

- за виразом (10) напруга на вторинній обмотці трансформатора (в режимі холостого ходу) дорівнює

$$U_{2H} = B \cdot U_H;$$

$$U_{2H} = 1 \cdot 20 = 20 \text{ В};$$

- за виразом (11) зворотна напруга на діодах дорівнює

$$U_{3B} = 1,4 \cdot U_{2H};$$

$$U_{3B} = 1,4 \cdot 20 = 28 \text{ В};$$

- за виразом (12) амплітуда струму через діоди дорівнює

$$I_m = 0,5 \cdot FI_H,$$

$$I_m = 0,5 \cdot 6 \cdot 0,3 = 0,9 A.$$

Висновок: так як розрахункові дані не перевищують допустимих значень для вибраних діодів, то діоди обрані вірно.

11. Визначення діючого значення струму вторинної обмотки трансформатора за виразом (13)

$$I_2 = \frac{D \cdot I_H}{\sqrt{2}};$$

$$I_2 = \frac{2,25 \cdot 0,3}{\sqrt{2}} = 0,48 A.$$

12. Визначення ємності конденсатора на виході випрямляча за виразом (14)

$$C = \frac{H}{r \cdot K_{по}};$$

$$C = \frac{400}{9,77 \cdot 0,1} = 409 \text{ мкФ}.$$

13. За результатами розрахунків обирається конденсатор з номінальним значенням ємності $C = 470 \text{ мкФ}$ [4].

Згладжувальні фільтри призначені для зменшення пульсацій випрямленої напруги. Випрямлена напруга, крім постійної складової, має й змінну складову, яка викликає пульсацію напруги. Згладжувальні фільтри включаються між випрямлячем і навантаженням для зменшення пульсацій (змінної складової) випрямленої напруги. Найчастіше застосовуються фільтри, що містять дросель й конденсатор (LC - типу) або резистор й конденсатор (RC - типу). Ці фільтри можуть дволанковим і багатоланковими.

Якість фільтру оцінюється коефіцієнтом згладжування, який визначається за виразом

$$q = \frac{K_{по}}{K_{пвих}}, \quad (15)$$

де $K_{по}$ – коефіцієнт пульсацій на вході фільтру;

$K_{пвих}$ – коефіцієнт пульсацій на виході фільтру.

Коефіцієнт згладжування приймається:

- для одноланкових фільтрів $q = 3 \dots 25$;
- для дволанкових або багатоланкових фільтрів $q > 25$.

Особливістю **LC- фільтрів** (див. рисунок 2.4) є незначне падіння постійної складової випрямленої напруги на дроселі, що дає можливість застосовувати такі фільтри в пристроях з відносно великим струмом навантаження.

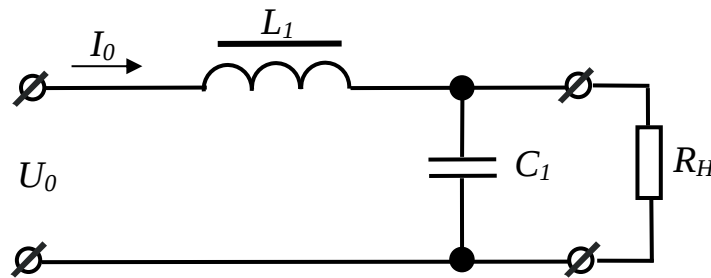


Рисунок 2.4 – Схема Г- подібного LC- фільтру

Слід відзначити, що істотним недоліком LC- фільтрів є велика маса дроселя, а також виникнення навколо нього магнітних полів, що впливають на роботу різних високочутливих вузлів електронної апаратури.

Необхідними умовами, що забезпечують згладжувальну дію фільтру, є співвідношення

$$1/m \cdot \omega \cdot C \ll R_H \text{ та } m \cdot \omega \cdot L \gg R_H, \quad (16)$$

де m – число фаз випрямляча. Для однофазних випрямлячів з нульовим виводом і однофазних мостових схем випрямлення $m = 2$; $\omega = 2\pi f$;

f – частота мережі живлення, Гц;

R_H – опір навантаження; $R_H = \frac{U_H}{I_H}$.

Добуток $L_1 C_1$ визначається за виразом

$$L_1 C_1 = 2,5 \cdot 10^4 (q + 1) / m^2 f^2, \quad (17)$$

де L_1 – індуктивність дроселя, Гн;

C_1 – ємність конденсатора, мкФ. Примітка: для LC- фільтрів слід обирати $q \geq 3$, щоб уникнути резонансних явищ.

Для однофазної мостової схеми випрямляча при частоті мережі живлення $f = 50 \text{ Гц}$ добуток $L_1 C_1$ дорівнює

$$L_1 C_1 = 10 \cdot (q+1) / m^2 \cdot 10^{-6}, \quad (18)$$

звідки ємність конденсатора визначається за виразом

$$C_1 = \frac{10 \cdot (q+1)}{L_1 \cdot m^2} \cdot 10^{-6}, \quad (19)$$

а індуктивність фільтру визначається за виразом

$$L_1 = \frac{\sqrt{q+1} \cdot \alpha}{m \cdot 2\pi \cdot f}, \quad (20)$$

де α – хвильовий опір фільтру, Ом ; приймається $\alpha = (0,15 \dots 0,25) \cdot R_H$.

За розрахунковим значенням C_1 обирається тип і стандартне значення ємності конденсатора, а за відомими значеннями L_1 і I_H можна провести 135в.135провітивний розрахунок дроселя фільтру або обрати стандартний дросель.

Слід відзначити, що для згладжувальних фільтрів використовуються електrolітичні і оксидно-напівпровідникові конденсатори.

Приклад розрахунку індуктивно-ємнісного фільтру

Вихідні дані для розрахунку:

- випрямлена напруга, $U_H = 20 \text{ В}$;
- випрямлений струм, $I_H = 0,3 \text{ А}$;
- коефіцієнт пульсацій напруги на вході фільтру, $K_{\text{ПО}} = 0,1$.

Результати розрахунків:

1. Визначення опору навантаження випрямляча та хвильового опору фільтру відповідно

$$R_H = \frac{U_H}{I_H};$$

$$R_H = \frac{20}{0,3} = 66,7 \text{ Ом};$$

$$\alpha = (0,15 \dots 0,25) \cdot R_H;$$

$$\alpha = 0,15 \cdot 66,7 = 10 \text{ Ом.}$$

2. Визначення індуктивності фільтру за виразом (20)

$$L_1 = \frac{\sqrt{q+1} \cdot \alpha}{m \cdot 2\pi \cdot f};$$

$$L_1 = \frac{\sqrt{3+1} \cdot 10}{2 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0318 \text{ Гн.}$$

3. Результати вибору дроселя: тип Д224 з $L_H = 0,04 \text{ Гн}$ [3].

4. Визначення ємності фільтру визначається за виразом (19)

$$C_1 = \frac{10 \cdot (q+1)}{L_1 \cdot m^2} \cdot 10^{-6},$$

$$C_1 = \frac{10 \cdot (3+1)}{0,0318 \cdot 2^2} \cdot 10^{-6} = 314 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 314 \text{ мкФ.}$$

5. Результати вибору конденсатора: тип К50-16 з $C_H = 330 \text{ мкФ}$. [4].

Згладжувальні **RC- фільтри** (див. рисунок 2.5) характеризуються малими габаритними розмірами, масою і вартістю та застосовуються в малопотужних випрямлячах при невеликих випрямлених струмах від 10 до 15 мА.

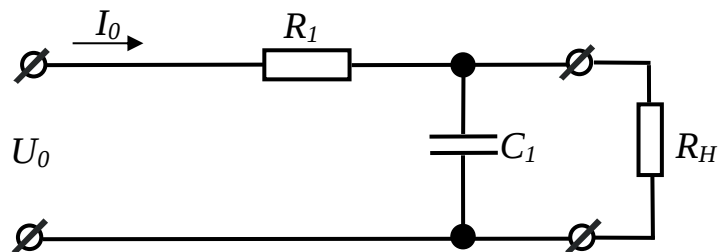


Рисунок 2.5 – Схема Г- подібного RC- фільтру

Опір резистора R_1 визначається за виразом

$$R_1 = (0,15 \dots 0,5) R_H, \quad (21)$$

де R_H – опір навантаження, Ом.

Коефіцієнт корисної дії резистивно-ємнісного фільтру порівняно малий і зазвичай складає $\eta_\phi = 0,6 \dots 0,8$. Причому, при $\eta_\phi = 0,8$: $R_1 = 0,25 \cdot R_H$. За значенням коефіцієнту згладжування фільтру, q , визначається добуток $R_1 C_1$ за виразом

$$R_1 C_1 = \frac{1,5 \cdot q}{m \cdot f}, \quad (22)$$

де m – число фаз випрямляча;

f – частота мережі живлення, Гц.

При цьому ємність конденсатора дорівнює

$$C_1 = \frac{1,5 \cdot q}{m \cdot f \cdot R_1}, \quad (23)$$

де C_1 – ємність конденсатора, мкФ;

R_1 – опір резистора, Ом.

За розрахунковим значенням C_1 обирається тип і стандартне значення ємності конденсатора.

Для визначення типу резистора необхідно знайти потужність, що розсіюється на ньому, за виразом

$$P_{R1} = I_H^2 \cdot R_1. \quad (24)$$

За розрахунковим значенням P_{R1} обирається тип і стандартне значення опору резистора.

Приклад розрахунку резистивно-ємнісного фільтру

Вихідні дані для розрахунку:

- випрямлена напруга, $U_H = 20 \text{ В}$;
- випрямлений струм, $I_H = 0,3 \text{ А}$;
- коефіцієнт пульсацій напруги на вході фільтру, $K_{ПО} = 0,1$.

Результати розрахунків:

1. Визначення опору резистора за виразом (21)

$$R_1 = (0,15 \dots 0,5) R_H;$$

$$R_1 = 0,15 \cdot 66,7 = 10 \text{ Ом}.$$

2. Визначення потужності, що розсіюється на резисторі за виразом (24)

$$P_{R1} = I_H^2 \cdot R_1;$$

$$P_{R1} = 0,3^2 \cdot 10 = 0,9 \text{ Вт}.$$

3. Результати вибору резистора: тип МЛТ-1 з $R_H = 10 \text{ Ом}$; $P_H = 1 \text{ Вт}$.

4. Визначення ємності фільтру за виразом (23)

$$C_1 = \frac{1,5 \cdot q}{m \cdot f \cdot R_1};$$

$$C_1 = \frac{1,5 \cdot 3}{2 \cdot 50 \cdot 10} = 0,0045 \Phi = 450_{\text{мк}\Phi}.$$

5. Результати вибору конденсатора: тип К50-16 з $C_H = 470_{\text{мк}\Phi}$ [4].

Стабілізатори – це електронні пристрої, які призначені для автоматичного підтримування незмінного (заданого) значення напруги (струму) на виході вторинного джерела живлення із заданим ступенем точності при дії різних дестабілізуючих чинників. Основними дестабілізуючими чинниками є: коливання напруги мережі живлення, зміна опору (струму) навантаження, зміна температури. На відміну від параметричних стабілізаторів компенсаційні стабілізатори напруги забезпечують необхідну стабільність напруги на навантаженні за допомогою від'ємного зворотного зв'язку, що впливає на регулюючий елемент. Залежно від схеми вмикання регулюючого елементу компенсаційні стабілізатори розділяють на послідовні і паралельні.

На рисунку 2.6 наведена схема одного з найбільш поширених (до появи інтегральних стабілізаторів) транзисторних стабілізаторів напруги послідовного типу. Стабілізатор містить регулюючий елемент (транзистори $VT1, VT2, VT3$), підсилювач постійного струму ($VT4, R1$), джерело опорної напруги ($VD, R2$), ділник напруги на резисторах $R3...R5$, резистори $R6, R7$, які використовуються для вибору режиму за постійним струмом транзисторів $VT1, VT2$, і конденсатор C . В стабілізаторі передбачено регулювання вихідної напруги, для чого до складу ділника увімкнений потенціометр $R4$.

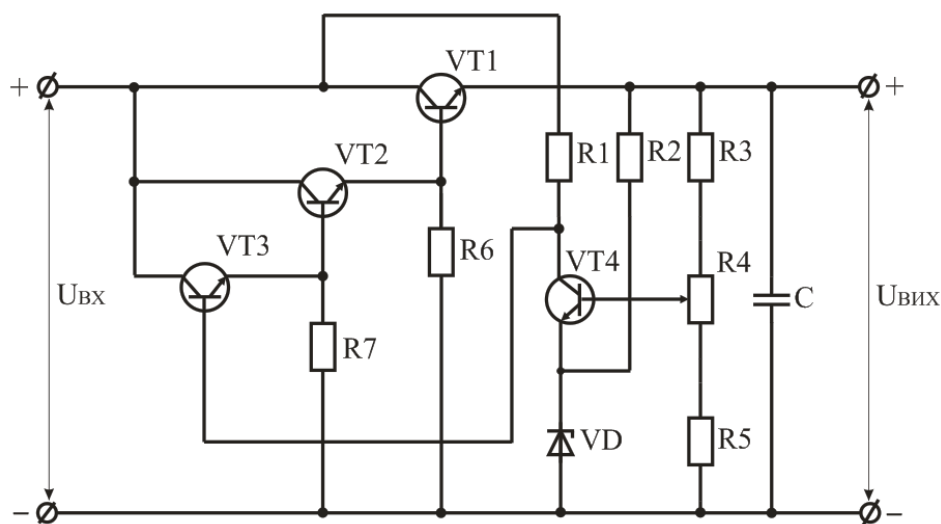


Рисунок 2.6 – Схема компенсаційного стабілізатора

Кількість транзисторів в регулюючому елементі залежить від струму навантаження, саме:

- при $I_H < (0,02 \dots 0,03) \text{ А}$ слід використовувати тільки один транзистор $VT1$;
- при $(0,02 \dots 0,03) \text{ А} < I_H < (0,5 \dots 0,6) \text{ А}$ слід використовувати два транзистори $VT1, VT2$;
- при $(0,5 \dots 0,6) \text{ А} < I_H < (4 \dots 5) \text{ А}$ слід використовувати всі три транзистори.

Стабілізатор може бути виконаний на транзисторах типу $p-n-p$ або $n-p-n$. При використанні транзисторів типу $p-n-p$ полярності напруги на вході і виході змінюються на протилежні (в порівнянні зі схемою, що наведена на рисунку 2.6). При цьому необхідно увімкнути стабілітрон VD таким чином, щоб напруга на його аноді була позитивною щодо катода.

Стабілізатор працює таким чином. При збільшенні вхідної напруги U_{BX} збільшується і вихідна напруга $U_{ВИХ}$, що викликає збільшення напруги на вході транзистора $VT4$ і його колекторного струму, внаслідок чого напруга на колекторі зменшується, а це викликає зменшення струму через транзистори регулюючого елементу й призводить до пропорційного зменшення $U_{ВИХ}$.

Аналогічні процеси відбуваються й при зменшенні струму навантаження, що приводить до збільшення $U_{ВИХ}$. При зменшенні U_{BX} або $U_{ВИХ}$ (при збільшенні струму навантаження) транзистор $VT4$ закривається, напруга на його колекторі і на базі транзистора регулюючого елементу збільшується, внаслідок чого $U_{ВИХ}$

збільшується майже до номінального значення. В стабілізаторі передбачено регулювання вихідної напруги, для чого до складу дільника вмикається потенціометр $R4$.

Розглянемо послідовність розрахунку компенсаційного стабілізатора, схема якого наведена на рисунку 2.6.

1. За таблицею 2.1 визначаються:

- мінімальна напруга, $U_{BX\ MIN}, B$;
- номінальна напруга, U_{BX}, B , й максимальна напруга, $U_{BX\ MAX}, B$;
- струм, що споживається стабілізатором від джерела живлення, $I_{BX} = I_H, A$.

Таблиця 2.1 – Вхідна напруга і струм

$U_{BX\ MIN}, B$	U_{BX}, B	$U_{BX\ MAX}, B$	$I_{BX} = I_H,$
$U_{BIX} + \Delta U_{BIX\ MAX} + (4...5) B$	$U_{BXMIN} \cdot (1 + a)$	$U_{BX} \cdot (1 + a)$	$(1,1...1,2) \cdot I_{HMAX}$

Примітка:

де a – відносні відхилення напруги мережі з урахуванням підвищення, a_{MAX} , й зниження, a_{MIN} , при цьому $a = a_{MAX} = a_{MIN} = \Delta U_C / 100$;

додаток $(4...5) B$ потрібна для забезпечення нормальної роботи транзисторів регулюючого елемента, тому приймається $\Delta U_{BIX\ MAX} = 0 B$.

2. В залежності від струму навантаження визначається кількість транзисторів, що входять в регулюючий елемент, згідно рекомендації:

- при $I_H < (0,02...0,03) A$ слід використовувати тільки один транзистор $VT1$;
- при $(0,02...0,03) A < I_H < (0,5...0,6) A$ слід використовувати два транзистори $VT1, VT2$;
- при $(0,5...0,6) A < I_H < (4...5) A$ слід використовувати всі три транзистори.

3. За таблицею 2.2 визначаються параметри транзисторів і обирається їх тип.

Таблиця 2.2 – Параметри транзисторів

Параметри	Транзистори			
	VT1	VT2	VT3	VT4
$I_{K\ MAX}, A$	$(1,1...1,2) \cdot I_{HMAX}$	$I_{KMAX1} / h_{21\Omega 1}$	$I_{KMAX2} / h_{21\Omega 2}$	$(3...5) \cdot 10^{-3}, A$
$U_{KE\ MAX}, B$	$U_{BX\ MAX} - U_{BIX} - \Delta U_{BIX\ MIN}$			$U_{BIX} + \Delta U_{BIX\ MAX} - U_{CT}$
$P_{K\ MAX}, Bm$	$U_{KE\ MAX} \cdot I_{K\ MAX}$			

Примітка: при розрахунку значення $U_{KE\ MAX}$, приймається таким, що дорівнює $\Delta U_{BIX\ MIN} = 2\ B$.

4. За таблицею 2.3 визначаються параметри і обирається тип стабілітрона VD за напругою стабілізації U_{CT} .

Таблиця 2.3 – Параметри стабілітрона

Параметри	Стабілітрон
	VD
U_{CT}, B	$U_{BIX} - \Delta U_{BIX\ MIN} - (2...3), B$
I_{CT}, A	$5 \cdot 10^{-3} + [(U_{BIX} + \Delta U_{BIX\ MAX}) / R2]$
P_{CT}, Bm	$U_{CT} \cdot I_{CT\ MAX}$

5. За таблицею 2.4 визначаються величини опорів резисторів $R1...R7$ та величини потужностей, що розсіюються на них, за виразом

$$P_R = U_R^2 / R = I_R^2 \cdot R. \quad (24)$$

Таблиця 2.4 – Розрахунок опорів резисторів

R1		R2	
$(U_{BX\ MIN} - U_{BIX} - \Delta U_{BIX\ MAX}) / (3...5) \cdot 10^{-3}$		$(U_{BX} - \Delta U_{BIX\ MIN} - U_{CT}) / (3...5) \cdot 10^{-3}$	
R3	R4		R5
$R3 + R4 + R5 = R_{ДЛЛ} = U_{BIX} / (5...10) \cdot 10^{-3}$			
$R_{ДЛЛ} - R4 - R5$	$R_{ДЛЛ} [1 - (U_{CT} / (U_{BIX} - \Delta U_{BIX\ MIN}))]$	$R_{ДЛЛ} \cdot U_{CT} / (U_{BIX} + \Delta U_{BIX\ MAX})$	
R6		R7	
$U_{BIX} / I_{КБ0\ 1}$		$U_{BIX} / I_{КБ0\ 2}$	

6. Вибір резисторів $R1...R7$: тип та R_H .

Приклад розрахунку компенсаційного стабілізатора напруги:

Вихідні дані для розрахунків:

- номінальна вихідна напруга, $U_{BHX} (U_H) = 20 \text{ В}$;
- межі регулювання вихідної напруги у бік збільшення і зменшення, а саме: $\Delta U_{BHX \text{ MAX}} = 0 \text{ В}$; $\Delta U_{BHX \text{ MIN}} = 2 \text{ В}$;
- струм навантаження, $I_{H \text{ MAX}} = 0,3 \text{ А}$;
- відносні відхилення напруги мережі з урахування підвищення, a_{MAX} , й зниження a_{MIN} ; $a_{\text{MAX}} = a_{\text{MIN}} = a = \Delta U_M / 100 = 5/100 = 0,05$.

Результати розрахунків:

1. Визначення вхідної мінімальної напруги (див. таблицю 2.1)

$$U_{BX \text{ MIN}} = U_{BHX} + \Delta U_{BHX \text{ MAX}} + (4 \dots 5) \text{ В};$$

$$U_{BX \text{ MIN}} = 20 + 0 + 4 = 24 \text{ В}.$$

2. Визначення номінальної вхідної напруги (див. таблицю 2.1)

$$U_{BX} = U_{BX \text{ MIN}} (1 + a);$$

$$U_{BX} = 24 (1 + 0,05) = 25,2 \text{ В}.$$

3. Визначення максимальної вхідної напруги (див. таблицю 2.1)

$$U_{BX \text{ MAX}} = U_{BX} (1 + a),$$

$$U_{BX \text{ MAX}} = 25,2 (1 + 0,05) = 26,46 \text{ В}.$$

4. Визначення струму, що споживається стабілізатором від джерела живлення

$$I_{BX} = I_H = (1,1 \dots 1,2) \cdot I_{H \text{ MAX}};$$

$$I_{BX} = I_H = 1,1 \cdot 0,3 = 0,33 \text{ А}.$$

5. В залежності від струму навантаження визначається кількість транзисторів в регулюючому елементі. Так як $I_H = 0,3 \text{ А}$, тому регулюючий елемент містить два транзистори VT1, VT2.

6. Визначення параметрів транзистора VT1 (див. таблицю 2.2)

$$I_{K \text{ MAX}} = (1,1 \dots 1,2) \cdot I_{H \text{ MAX}};$$

$$I_{K \text{ MAX}} = 1,1 \cdot 0,3 = 0,33 \text{ А};$$

$$U_{KE \text{ MAX}} = U_{BX \text{ MAX}} - U_{BHX} - \Delta U_{BHX \text{ MIN}};$$

$$U_{KE\ MAX} = 26,46 - 20 - 2 = 4,46\ B;$$

$$P_{K\ MAX} = U_{KE\ MAX} \cdot I_{K\ MAX};$$

$$P_{K\ MAX} = 4,46 \cdot 0,33 = 1,47\ Bm.$$

Результати вибору транзистора VT1: тип П701 з параметрами: $I_{K\ MAX} = 0,5\ A$; $U_{KE\ MAX} = 40\ B$; $P_{K\ MAX} = 10\ Bm$; $h_{21Э1} = 10...40$; $I_{КБ0} = 100\ \mu A$ [4].

7. Визначення параметрів транзистора VT2:

$$I_{K\ MAX} = I_{K\ MAX\ 1} / h_{21Э1};$$

$$I_{K\ MAX} = 0,33 / 10 = 0,033\ A;$$

$$U_{KE\ MAX} = U_{BX\ MAX} - U_{BIX} - \Delta U_{BIX\ MIN};$$

$$U_{KE\ MAX} = 26,46 - 20 - 2 = 4,46\ B;$$

$$P_{K\ MAX} = U_{KE\ MAX} \cdot I_{K\ MAX};$$

$$P_{K\ MAX} = 4,46 \cdot 0,033 = 0,147\ Bm.$$

Результати вибору транзистора VT2: тип П701 з параметрами: $I_{K\ MAX} = 0,5\ A$; $U_{KE\ MAX} = 25\ B$; $P_{K\ MAX} = 0,3\ Bm$; $h_{21Э1} = 30...80$; $I_{КБ0} = 25\ \mu A$ [4].

8. Визначення параметрів транзистора VT4 (див. таблицю 2.2)

$$I_{K\ MAX} = (3...5) \cdot 10^{-3}\ A;$$

$$U_{KE\ MAX} = U_{BIX} + \Delta U_{BIX\ MAX} - U_{CT};$$

$$U_{KE\ MAX} = 20 + 0 - 16 = 4\ B;$$

$$P_{K\ MAX} = U_{KE\ MAX} \cdot I_{K\ MAX};$$

$$P_{K\ MAX} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 4 = 0,012\ Bm.$$

Результати вибору транзистора VT2: тип П701 з параметрами: $I_{K\ MAX} = 20\ A$; $U_{KE\ MAX} = 20\ B$; $P_{K\ MAX} = 150\ mBm$; $h_{21Э1} = 15...45$; $I_{КБ0} = 15\ \mu A$ [4].

9. Визначення параметрів стабілітрона (див. таблицю 2.3)

$$U_{CT} = U_{BIX} - \Delta U_{BIX\ MIN} - (2...3)\ B;$$

$$U_{CT} = 20 - 2 - 2 = 16\ B;$$

$$I_{CT} = 5 \cdot 10^{-3} + [(U_{BIX} + \Delta U_{BIX\ MAX}) / R2];$$

$$I_{CT} = 5 \cdot 10^{-3} + [(20 + 0) / 667] = 0,035\ A;$$

$$P_{CT} = U_{CT} \cdot I_{CT\ MAX};$$

$$P_{CT} = 16 \cdot 35 \cdot 10^{-3} = 0,56\ Bm.$$

Результати вибору стабілітрона: тип Д816А з параметрами: $U_{CT} = 22 \text{ В}$;

$I_{CT \text{ MIN}} = 10 \text{ мА}$; $I_{CT \text{ MAX}} = 230 \text{ мА}$ [4].

10. Визначення величин опорів резисторів $R_1 \dots R_7$ (див. таблицю 2.4)

$$R_1 = (U_{BX \text{ MIN}} - U_{BIX} - \Delta U_{BIX \text{ MAX}}) / (3 \dots 5) \cdot 10^{-3};$$

$$R_1 = (24 - 20 - 0) / 3 \cdot 10^{-3} = 1333 \text{ Ом};$$

$$R_2 = (U_{BIX} - \Delta U_{BIX \text{ MIN}} - U_{CT}) / (3 \dots 5) \cdot 10^{-3};$$

$$R_2 = (20 - 2 - 16) / 3 \cdot 10^{-3} = 667 \text{ Ом};$$

$$R_{ДЛЛ} = U_{BIX} / (5 \dots 10) \cdot 10^{-3};$$

$$R_{ДЛЛ} = 20 / 5 \cdot 10^{-3} = 4000 \text{ Ом};$$

$$R_4 = R_{ДЛЛ} [1 - (U_{CT} / (U_{BIX} - \Delta U_{BIX \text{ MIN}}))];$$

$$R_4 = 4000 \cdot [1 - (16 / (20 - 2))] = 444 \text{ Ом};$$

$$R_5 = R_{ДЛЛ} \cdot U_{CT} / (U_{BIX} + \Delta U_{BIX \text{ MAX}});$$

$$R_5 = 4000 \cdot 16 / (20 + 0) = 3200 \text{ Ом};$$

$$R_3 = R_{ДЛЛ} - R_4 - R_5;$$

$$R_3 = 4000 - 444 - 3200 = 356 \text{ Ом};$$

$$R_6 = U_{BIX} / I_{КБ01};$$

$$R_6 = 20 / 100 \cdot 10^{-6} = 200000 \text{ Ом} = 200 \text{ кОм}.$$

Визначення величин потужності, що розсіюється на резисторах, за виразом

(24)

$$P_{R1} = I_{R1}^2 \cdot R_1;$$

$$P_{R1} = (3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1333 = 0,012 \text{ Вт};$$

$$P_{R2} = I_{R2}^2 \cdot R_2;$$

$$P_{R2} = (3 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 667 = 0,006 \text{ Вт};$$

$$P_{R3} = I_{R3}^2 \cdot R_3;$$

$$P_{R3} = (5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 356 = 0,009 \text{ Вт};$$

$$P_{R4} = I_{R4}^2 \cdot R_4;$$

$$P_{R4} = (5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 444 = 0,01 \text{ Вт};$$

$$P_{R5} = I_{R5}^2 \cdot R_5;$$

$$P_{R5} = (5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3200 = 0,08 \text{ Вт};$$

$$P_{R6} = I_{R6}^2 \cdot R_6;$$

$$P_{R6} = (100 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 200000 = 0,002 \text{ Вт}.$$

11. Результати вибору резисторів: R_1 тип МЛТ- 0,125; $R_H = 1,5 \text{ кОм}$;
 R_2 тип МЛТ- 0,125; $R_H = 1,0 \text{ кОм}$; R_3 тип МЛТ- 0,125; $R_H = 470 \text{ Ом}$;
 R_4 тип МЛТ- 0,125; $R_H = 470 \text{ Ом}$; R_5 тип МЛТ- 0,125; $R_H = 3,3 \text{ кОм}$;
 R_6 тип МЛТ- 0,125 ; $R_H = 220 \text{ кОм}$ [4]:

3. Порядок виконання роботи

1. Скласти структурну схему малопотужного стабілізованого джерела живлення постійної напруги – рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

2. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці 4.1, що наведена в пункті 4 лабораторної роботи, записати вихідні дані для розрахунків – таблиця 1 звіту до лабораторної роботи.

3. Вибрати і розрахувати однофазний випрямляч:

3.1 Привести схему однофазного мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження і пояснити принцип роботи - рисунок 2.

3.2 Визначити зворотну напругу на діодах, середній випрямлений струм, амплітуду струму через діоди.

3.3 Вибрати тип випрямних діодів.

3.4 Визначити опір навантаження випрямляча.

3.5 Визначити активний опір фази випрямляча, для чого розрахувати опір обмоток трансформатора і прямий опір діода.

3.6 Визначити допоміжні коефіцієнти A , B , D , F , H .

3.7 Здійснити перевірку правильності вибору випрямних діодів.

3.8 Визначити діюче значення струму вторинної обмотки трансформатора.

3.9 Визначити ємність конденсатора на виході випрямляча.

4. Вибрати і розрахувати згладжуючий фільтр:

4.1 Привести схему LC - фільтру – рисунок 3, й пояснити принцип дії.

4.2 Визначити параметри LC - фільтру.

4.3 Привести схему RC - фільтру – рисунок 4, й пояснити принцип дії.

4.4 Визначити параметри RC - фільтру.

5. Вибрати і розрахувати компенсаційний стабілізатор постійної напруги:

- 5.1 Привести схему компенсаційного стабілізатора напруги і пояснити призначення елементів стабілізатора – рисунок 5.
- 5.2 Описати принципу роботи компенсаційного стабілізатора.
- 5.3 Визначити вхідну напругу (мінімальну $U_{BX MIN}$, номінальну U_{BX} і максимальну $U_{BX MAX}$).
- 5.4 Визначити число транзисторів, що входять в регулюючий елемент, в залежності від струму навантаження
- 5.5 Визначити параметри транзисторів і вибрати їх тип.
- 5.6 Визначити параметри і вибрати тип стабілітрона VD .
- 5.7 Визначити опори резисторів $R1 \dots R7$ і потужності, що розсіюються на них.
- 5.8 Вибрати тип резисторів та параметри.

4. Вихідні дані для розрахунків

Вихідні дані для розрахунків наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Варіанти індивідуальних завдань

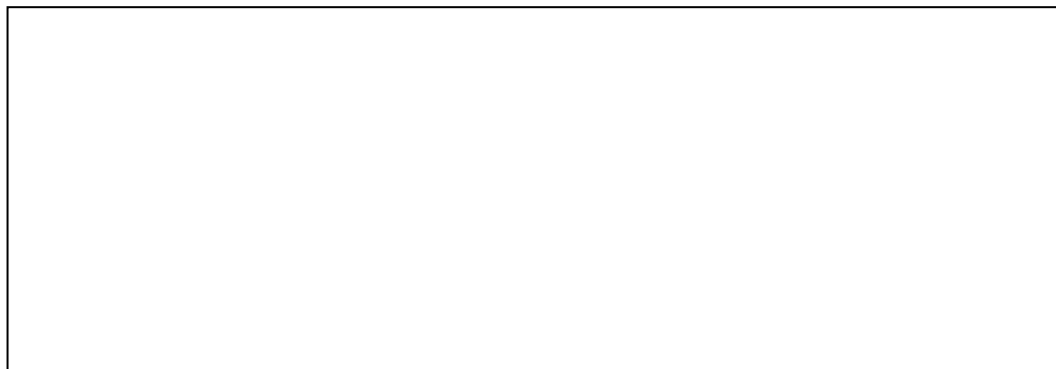
Вихідні дані для розрахунків		Номер варіанта									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	U_H, B	5	9	12	15	18	20	24	27	30	36
	I_H, A	1,2	1,0	0,6	0,5	0,35	0,2	0,15	0,12	0,1	0,08
U_M, B		127	220	127	220	127	220	127	220	127	220
$\Delta U_M, \%$		5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
$K_{П0}, \%$		0,5	1,0	1,5	2,0	0,8	1,3	1,8	2,3	2,5	0,3

Приклад вибору варіанта за значенням числа, яке надає викладач 32:

- з колонки 3 обираються вихідні дані для розрахунку, а саме: $U_M = 220 B$; $\Delta U_M = 20\%$; $K_{П0} = 2,0 \%$.
- з колонки 2 обираються вихідні дані для розрахунку, а саме: $U_H = 12 B$; $I_H = 0,6 A$.

5. Звіт звіту

1. Найменування лабораторної роботи.



2. Рисунок 1 - Принципова електрична схема малопотужного стабілізованого джерела живлення постійної напруги

3. Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунків згідно варіанту

Вихідні дані	Значення
Варіант	
Випрямлена напруга, U_H, B	
Випрямлений струм, I_H, A	
Напруга мережі живлення, U_M, B	
Відхилення напруги мережі живлення, $\Delta U_M, B$	
Коефіцієнт пульсацій напруги на вході фільтру, $K_{по}, \%$	

4. Результати розрахунку однофазного мостового випрямляча, що працює на ємнісне навантаження:



Рисунок 2 – Схема мостового випрямляча,
що працює на ємнісне навантаження

- результати розрахунків: зворотної напруги на діодах, середнього випрямленого струму, амплітуди струму через діоди;
- результати вибору типу випрямних діодів;
- результати розрахунків: опору навантаження випрямляча та активного опору фази випрямляча з одночасним визначенням опору обмоток трансформатора і прямого опору діода;
- результати розрахунків: допоміжних коефіцієнтів A, B, D, F, H ;
- результати перевірки правильності вибору випрямних діодів;
- результати розрахунків: діючого значення струму вторинної обмотки трансформатора та величини ємності конденсатора на виході випрямляча.

5. Результати розрахунку згладжуючих фільтрів:

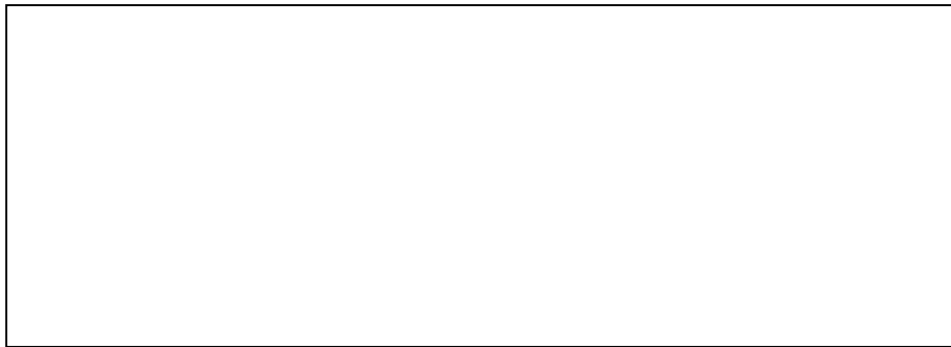


Рисунок 3 – Схема Г-подібного згладжуючого LC - фільтру

- результати розрахунків параметрів LC - фільтру: опору навантаження та хвильового опору фільтру, індуктивності фільтру;
- результати вибору дроселю фільтру;
- результати розрахунку ємності фільтру;
- результати вибору конденсатора.

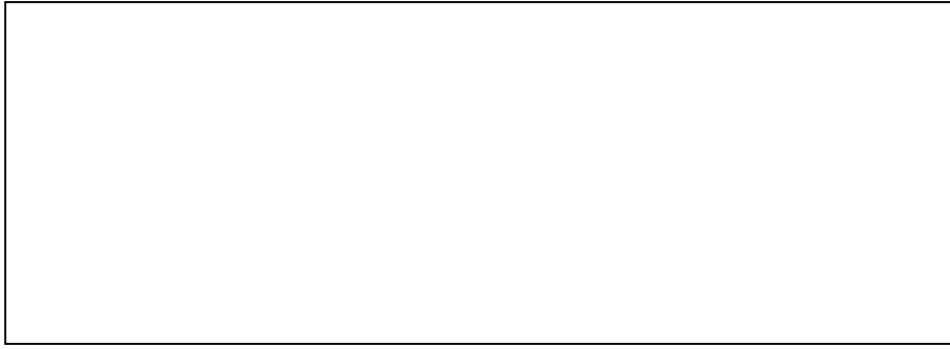


Рисунок 4 – Схема Г-подібного згладжуючого RC - фільтру

- результати розрахунків параметрів RC - фільтру: опору резистора R_1 , потужності, що розсіюється на резисторі R_1 ;
- результати вибору резистора R_1 та конденсатора C_1 фільтру.



Рисунок 5 – Схема компенсаційного стабілізатора напруги

- результати розрахунків компенсаційного стабілізатора напруги: мінімальної напруги, $U_{BX\ MIN}$, B ; номінальної напруги, U_{BX} , B , й максимальної напруги, $U_{BX\ MAX}$, B ; струму, що споживається стабілізатором від джерела живлення, $I_{BX} = I_H$, A ; кількості транзисторів, що містяться в регулюючому елементі;
- результати визначення типів та параметрів транзисторів;
- результати визначення типу стабілітрона VD та його параметрів;
- результати розрахунків опорів резисторів $R_1 \dots R_7$ і потужності, що розсіюються на них;
- результати вибору типів резисторів та їх параметрів.

6. Аналіз отриманих результатів та висновки.

Лабораторна робота
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕГРАЛЬНИХ
СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ

Мета роботи:

Набуття практичних навичок при виборі й застосуванні інтегральних стабілізаторів напруги для живлення електронних пристроїв.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1. Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- призначення, основні параметри інтегральних стабілізаторів напруги;
- методику вибору і розрахунку інтегральних стабілізаторів напруги.

Ознайомитись з:

- теоретичним матеріалом за рекомендованою літературою [1, с. 193-194; 2, с. 222-224; 3, с. 336-344].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- вихідні дані для розрахунків згідно варіанту;
- результати розрахунку стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації та універсального стабілізатора напруги;
- рисунок 1- Принципова електрична схема стабілізатора напруги з фіксованою вихідною напругою;
- результати розрахунку стабілізатора універсального стабілізатора напруги;
- рисунок 2 – Принципова електрична схема універсального стабілізатора напруги;
- аналіз отриманих результатів та висновки.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний

варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 12».

1.2 Запитання для самопідготовки

1. Що таке стабілізатори напруги? Наведіть класифікацію стабілізаторів напруги.
2. Поясніть призначення стабілізаторів напруги.
3. Поясніть сутність компенсаційного методу стабілізації.
4. Поясніть особливості роботи стабілізаторів у інтегральному виконанні з фіксованою вихідною напругою.
5. Поясніть особливості роботи стабілізаторів у інтегральному виконанні з регульованою вихідною напругою.
6. Які основні параметри інтегральних стабілізаторів напруги вам відомі?

1.3 Рекомендована література

1. Квітка С.О. Електроніка та 151в.151провідного151іка: підручник / С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.
2. Квітка С.О. Електроніка та 151в.151провідного151іка: навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлев, О.В. Нікітіна ; За 151в.151. Проф. В.Ф. Яковлева. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.
3. Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка та мікросхемо-техніка: теорія і практикум / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков А.Г.; за 151в.151. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.

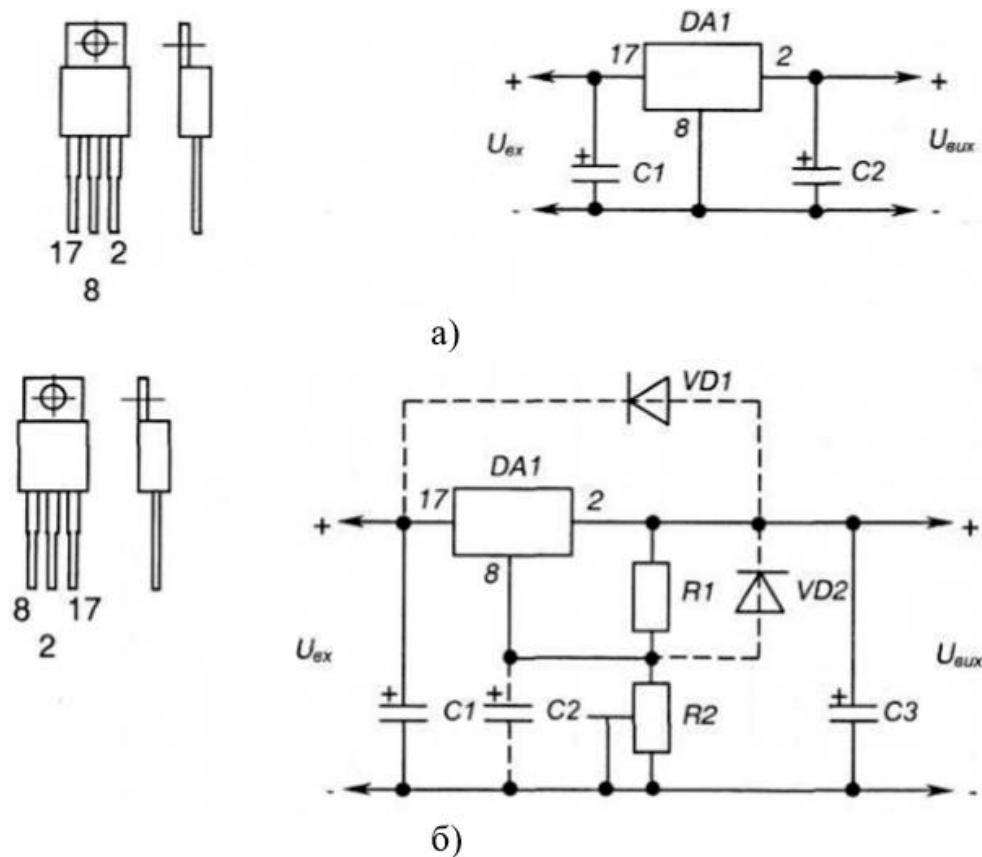
2. Основні теоретичні відомості

Сучасні електронні пристрої для забезпечення високої точності своєї роботи висувають високі вимоги до стабільності напруги живлення. Задовольнити їх при високих інших показниках (габарити, маса, вартість) дозволяє широке застосування стабілізаторів у інтегральному виконанні, як з фіксованою вихідною напругою, так й універсальних – з регульованою вихідною напругою.

Стабілізатори з фіксованою вихідною напругою мають внутрішній дільник, що забезпечує встановлення необхідного значення вихідної напруги, при

цьому налагоджування на величини стандартного ряду напруг живлення здійснюється в процесі виробництва.

Встановлення необхідного значення вихідної напруги в універсальних стабілізаторах забезпечується зовнішнім резистивним дільником, тому такі стабілізатори мають назву *трививідні*, бо монтуються у стандартному корпусі потужних транзисторів – рисунок 2.1.



а – ІМС стабілізаторів серії 142 з фіксованою напругою стабілізації;

б – ІМС універсального стабілізатора напруги типу КР142ЕН12А

Рисунок 2.1 – ІМС серії 142 та типові схеми їх вмикання

Слід відзначити, що, окрім якісного виконання основної функції – стабілізації вихідної напруги, також забезпечується за рахунок додатково введених внутрішніх вузлів (ІМС побудована на 26 транзисторах) захист від перевищення допустимого значення вихідного струму й потужності, що розсіюється корпусом ІМС. При короткому замиканні у навантаженні величина вихідного струму обмежується на рівні, приблизно удвічі більшому за номінальне значення для критичного режиму, а при досягненні температурою корпусу заданої допустимої

величини величина вихідного струму обмежується до такого значення, за якого температура більше не підвищується. Оскільки у вказаних випадках стабілізатор працює у режимі обмеження (стабілізації) струму або обмеження потужності, тому напруга на його виході при цьому відповідно зменшується. ІМС розраховані на роботу з тепловідводом, до якого вони кріпляться за фланець гвинтом з гайкою (при конструюванні пристроїв слід мати на увазі, що у таких ІМС фланець має електричний зв'язок з середнім виводом). Величини ємностей електролітичних конденсаторів у схемах вмикання ІМС стабілізаторів повинні бути не меншими за 10 мкФ .

Універсальний три вивідний стабілізатор типу КР142ЕН12А, хоча й вимагає застосування зовнішнього діляника з двох резисторів, має кращі параметри вихідної напруги. У якості резистора R_2 застосований резистор змінного опору, тому такий стабілізатор має регулювання вихідної напруги. При застосуванні транзисторних ключів підмикання резисторів R_2 різної величини стабілізатор функціонує за величиною вихідної напруги, програмованою зовнішнім пристроєм керування. За великих значень вихідної напруги цей стабілізатор можна виконати з електронним вимиканням, якщо паралельно до резистора R_2 підключити транзисторний ключ. При розімкненому стані ключа на виході стабілізатора діє напруга заданої діляником величини. Якщо перевести ключ у замкнений стан на виході отримується мінімальне значення напруги, яке дорівнює $U_{BIX \text{ MIN}} = 1,3 \text{ В}$.

При вмиканні навантаження між виводом керування (8) ІМС і від'ємним полюсом джерела U_{BX} (на місце R_2), починає функціонувати стабілізатор струму. Величина струму навантаження буде визначатися величиною опору резистора R_1 за виразом

$$I_H = \frac{U_{BIX \text{ MIN}}}{R_1}. \quad (1)$$

Величини опорів резисторів діляника R_1, R_2 зв'язані за формулою

$$U_{BIX} = U_{BIX \text{ MIN}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \cdot R_2 \cdot I_p, \quad (2)$$

де I_P – струм виводу регулювання ІМС, який необхідно задавати не меншим за 55 мкА.

Конденсатор $C2$ встановлюється за вихідних напруг, близьких до мінімальної. За вихідної напруги, що перевищує 25 В, необхідно встановлювати захисні діоди $VD1$ і $VD2$ (тип, що рекомендується, КД521А), які забезпечують розряд конденсаторів $C2$ ($VD1$, $VD2$) та $C3$ ($VD1$) при замиканні у вхідному колі випрямляча (до стабілізатора), а також конденсатора $C2$ ($VD2$) при замиканні у вихідному колі – на навантаженні. Якщо довжина провідників, що з'єднують ІМС з фільтром випрямляча, не перевищує 70 мм, конденсатор $C1$ можна не встановлювати. Для забезпечення максимальної якості роботи стабілізатора елементи $C3$, $R1$, $R2$ та навантаження слід підключати якомога ближче до виводів ІМС. Необхідно також у процесі роботи забезпечувати не перевищення допустимої потужності ІМС, що розсіюється.

Щоб за вихідними даними отримати величину потужності, що розсіюється, необхідно визначити величину струму навантаження за виразом

$$I_H = P_H / U_{ВИХ}, \quad (3)$$

при цьому максимальне падіння напруги на ІМС визначається за виразом

$$\Delta U = U_{ВХ\ MAX} - U_{ВИХ}, \quad (4)$$

а величина потужності, що розсіюється ІМС, слід визначати за виразом

$$P_{ІМС} = \Delta U \cdot I_H \leq P_{ІМС\ доп}, \quad (5)$$

де $P_{ІМС\ доп}$ – допустима потужність, що розсіюється ІМС (без тепловідводу або з ним).

Слід зазначити, що величини $U_{ВХ\ MAX}$ та $U_{ВХ\ MIN}$ обумовлюються, з однієї сторони, зниженням напруги на виході випрямляча під навантаженням, а з іншої – допустимими значеннями відхилення напруги мережі від номінальної величини. При цьому напруга $U_{ВХ\ MIN}$ обов'язково повинна перевищувати значення згідно виразу

$$U_{ВХ\ MIN} = U_{ВИХ} + U_{ІМС\ MIN}, \quad (6)$$

де $U_{ІМС\ MIN}$ – мінімально допустиме падіння напруги на ІМС (див. таблицю 2.1).

Приклад розрахунку стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації

Вихідні дані для розрахунку:

- напруга на виході, $U_{ВИХ} = 9 \text{ В}$;
- мінімальна вхідна напруга, $U_{ВХМІН} = 14 \text{ В}$;
- максимальна вхідна напруга, $U_{ВХМАХ} = 20 \text{ В}$;
- потужність навантаження, $P_H = 0,5 \text{ Вт}$.

Результати розрахунків:

Для побудови стабілізатора напруги на основі ІМС з фіксованим значенням вихідної напруги за значенням $U_{ВИХ} = 9 \text{ В}$ обирається відповідна ІМС типу КР142ЕН8А, яку необхідно перевірити на можливість застосування за напругою та на не перевищення допустимого значення потужності, що розсіюється ІМС, в заданих умовах.

1. Перевірка ІМС за напругою згідно умов (7) та (8)

$$U_{ВХ МАХ} \leq U_{ВХ МАХ \text{ ДОП}}, \quad (7)$$

де $U_{ВХМАХДОП}$ – максимально допустима вхідна напруга ІМС;

$$U_{ВХ МІН} - U_{ВИХ} \geq U_{ІМС МІН}, \quad (8)$$

так як $U_{ВХМАХ} = 20 \text{ В} < U_{ВХМАХДОП} = 35 \text{ В}$,

$$U_{ВХМІН} - U_{ВИХ} = 14 - 9 = 5 \text{ В} > U_{ІМСМІН} = 2,5 \text{ В},$$

тому за напругою обрана ІМС КР142ЕН8А відповідає умовам завдання.

2. Перевірка на не перевищення допустимого значення потужності, що розсіюється ІМС згідно умови (5)

$$P_{ІМС} = \Delta U \cdot I_H \leq P_{ІМСДОП},$$

при цьому величина струму навантаження визначається за виразом (3)

$$I_H = P_H / U_{ВИХ};$$

$$I_H = 0,5 / 9 = 0,056 \text{ А},$$

а максимальне падіння напруги за виразом (4) дорівнює

Таблиця 2.1 – Параметри ІМС стабілізаторів напруги серії 142

Електричні параметри	КР142 ЕН5А	КР142 ЕН5Б	КР142 ЕН8А	КР142 ЕН8Б	КР142 ЕН8В	КР142 ЕН9А	КР142 ЕН9Б	КР142 ЕН9Б	КР142 ЕН12А
Вихідна напруга, В	4,9... 5,1	5,88... 6,12	8,73... 9,27	11,64... 12,36	14,55... 15,45	19,6... 24,48	23,52... 24,48	26,46... 27,54	1,3... 37
Номінальна вихідна напруга, В	5	6	9	12	15	20	24	27	-
Мінімальне падіння напруги, В, не більш як	2,5								3,5
Нестабільність вихідної напруги від змін вхідної напруги, %/В, не більш як	0,05								0,01
Нестабільність вихідної напруги від змін вихідного струму, %/А, не більш як	2								0,2
Параметри граничного режиму									
Вхідна напруга, В	7,5... 15	8,5... 15	11,5... 35	14,5... 35	17,5... 35	23... 45	27... 45	30... 45	5... 45
Вихідний струм, А	3								1
Потужність, розсіювана без тепловідводу, Вт	1								
Потужність, розсіювана з тепловідводом, Вт	10								10
Робочий інтервал температур, °С	-10...+70								

$$\Delta U = U_{BXMAX} - U_{BIX};$$

$$\Delta U = 20 - 9 = 11 \text{ В},$$

тоді

$$P_{IMC} = 11 \cdot 0,056 = 0,616 \text{ Вт} \leq P = 1 \text{ Вт},$$

отже, за результатами перевірки встановлено, що ІМС слід використовувати без тепловідводу.

Схема електрична принципова стабілізатора з фіксованою вихідною напругою наведена на рисунку 2.2.

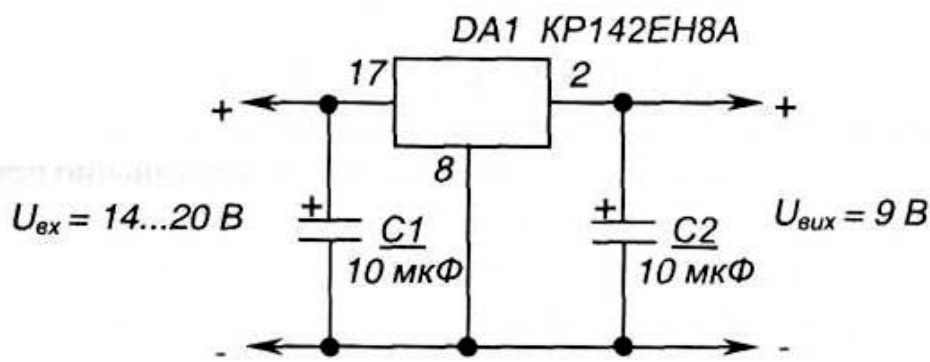


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова стабілізатора напруги на ІМС КР142ЕН8А

Приклад розрахунку універсального стабілізатора на ІМС КР142ЕН12А

Вихідні дані для розрахунку:

- напруга на виході, $U_{BIX} = 8 \text{ В}$;
- мінімальна вхідна напруга, $U_{BXMIN} = 13 \text{ В}$;
- максимальна вхідна напруга, $U_{BXMAX} = 19 \text{ В}$;
- потужність навантаження, $P_H = 2 \text{ Вт}$.

Результати розрахунків:

Для побудови стабілізатора напруги на основі ІМС КР142ЕН12А з $U_{BIX} = 8 \text{ В}$, яку необхідно перевірити на можливість застосування за напругою та на не перевищення допустимого значення потужності, що розсіюється ІМС, в заданих умовах.

1.Перевірка за напругою згідно умов (7) та (8)

$$U_{BX \text{ MAX}} \leq U_{BX \text{ MAX ДОП}},$$

$$U_{BX \text{ MIN}} - U_{BIX} \geq U_{IMC \text{ MIN}},$$

так як

$$U_{BXMAX} = 19 \text{ В} < U_{BXMAXДОП} = 45 \text{ В},$$

$$U_{BXMIN} - U_{BHX} = 13 - 8 = 5 \text{ В} > U_{IMCMIN} = 3,5 \text{ В},$$

тому за напругою обрана ІМС КР142ЕН12А відповідає умовам завдання.

2.Перевірка на не перевищення допустимого значення потужності, що розсіюється ІМС згідно умови (5)

$$P_{IMC} = \Delta U \cdot I_H \leq P_{IMCДОП},$$

при цьому величина струму навантаження визначається за виразом (3)

$$I_H = P_H / U_{BHX};$$

$$I_H = 2 / 8 = 0,25 \text{ А},$$

а максимальне падіння напруги за виразом (4) дорівнює

$$\Delta U = U_{BXMAX} - U_{BHX};$$

$$\Delta U = 19 - 8 = 11 \text{ В};$$

тоді

$$P_{IMC} = 11 \cdot 0,25 = 2,75 \text{ Вт};$$

$$1 \text{ Вт} < P_{IMC} = 2,75 \text{ Вт} < 10 \text{ Вт},$$

отже, за результатами перевірки встановлено, що ІМС КР142ЕН12А слід використовувати з тепловідводом.

3.Визначення величини опорів резисторів дільника R_1 , R_2 , яким задається значення вихідної напруги стабілізатора. Значення струму виводу регулювання ІМС дорівнює $I_P = 0,1 \text{ мА}$.

При роботі ІМС КР142ЕН12А у режимі стабілізатора напруги опір резистора R_1 обирають таким, що дорівнює $R_1 = 240 \text{ Ом}$.

Величина опору R_2 визначається за виразом

$$R_2 = \frac{(U_{BHX} - U_{BHXMIN})}{U_{BHXMIN} + I_P \cdot R_1} \cdot R_1; \quad (9)$$

$$R_2 = \frac{(8 - 1,3)}{13 + 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 240} \cdot 240 = 1215 \text{ Ом}.$$

4. Результати вибору резисторів типу С2-33 з опором $R_1 = 240 \text{ Ом}$ та $R_2 = 1,2 \text{ кОм}$ відповідно та потужністю $0,125 \text{ Вт}$.

5. Так як вихідна напруга стабілізатора значно перевищує за величиною мінімальне значення напруги стабілізації, а $U_{BX MAX} < 25 \text{ В}$, то ІМС можна

використовувати без елементів $C2$, $VD1$ та $VD2$. Результати вибору конденсатора $C1$: тип К50-35 на напругу 25 В; конденсатора $C3$: тип К50-35 на напругу 10 В.

6. Схема електрична принципова стабілізатора з фіксованою вихідною напругою наведено на рисунку 2.3.

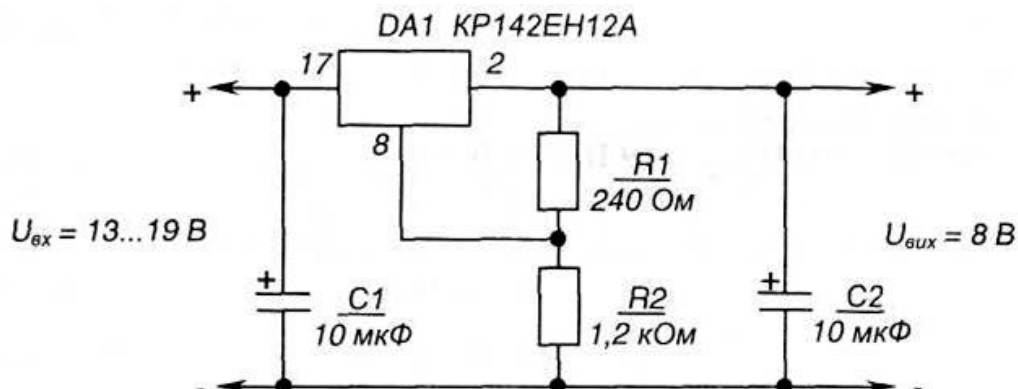


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова стабілізатора напруги на ІМС КР142ЕН12А

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці 4.1, що наведена в пункті 4 лабораторної роботи, записати вихідні дані для розрахунків – таблиці 1 та 2 звіту до лабораторної роботи.

2. Обрати та розрахувати стабілізатор з фіксованою напругою стабілізації.

3. Навести схему електричну принципову стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації – рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

4. Обрати та розрахувати універсальний стабілізатор на ІМС КР142ЕН12А.

5. Навести схему електричну принципову універсального стабілізатора на ІМС КР142ЕН12А – рисунок 2 звіту до лабораторної роботи.

4. Вихідні дані для розрахунків

Вихідні дані для розрахунків стабілізаторів наведені в таблиці 4.1.

При виборі варіантів слід використовувати:

- для варіантів завдань, що відповідають десяткам числа номеру варіанту, який надає викладач, обираються вихідні дані для розрахунку *стабілізаторів з фіксованою напругою стабілізації*;

- для варіантів завдань, що відповідають одиницям числа номеру варіанту, який надає викладач, обирається вихідні дані для розрахунку *універсального регульованого стабілізатора* на ІМС КР142ЕН12А.

Таблиця 4.1 – Варіанти індивідуальних завдань

Вихідні дані для розрахунків		Номер варіантів									
стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації	універсального стабілізатора на ІМС КР142ЕН12А	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
U_{BIX}, B		5	6,3	9	12	15	20	24	27	12	15
U_{BXMIN}, B		9	10	14	17	20	24	28	34	16	19
U_{BXMAX}, B		14	15	20	24	28	34	40	44	22	27
P_H, Bm		1	0,9	1,8	2,4	3	3,6	4,4	5,4	2,8	1,5
	U_{BIX}, B	1,5	3	4,5	7	10	14	16	17	18	25
	U_{BXMIN}, B	6	7	9	12	14	19	20	22	24	30
	U_{BXMAX}, B	9	10	12	15	20	27	28	32	35	42
	P_H, Bm	0,3	0,6	0,9	1,2	4,2	2,8	2,4	3,4	2,7	5

Приклад вибору варіанта за значенням числа, яке надає викладач 32:

- з колонки 3 обираються вихідні дані для розрахунку стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації, а саме: $U_{BIX} = 12 B$, $U_{BXMIN} = 17 B$, $U_{BXMAX} = 24 B$, $P_H = 2,4 Bm$;

- з колонки 2 обираються вихідні дані для розрахунку універсального стабілізатора, а саме: $U_{BIX} = 4,5 B$, $U_{BXMIN} = 9 B$, $U_{BXMAX} = 12 B$, $P_H = 0,9 Bm$.

5. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.

2. Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунку стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації згідно варіанту

Вихідні дані	Значення
Варіант	
Вихідна напруга, $U_{ВИХ}$, В	
Мінімальна вхідна напруга, $U_{ВХМІН}$, В	
Максимальна вхідна напруга, $U_{ВХМАХ}$, В	
Потужність навантаження, P_H , Вт	

3. Таблиця 2 – Вихідні дані для розрахунку для розрахунку універсального регульованого стабілізатора згідно варіанту

Вихідні дані	Значення
Варіант	
Вихідна напруга, $U_{ВИХ}$, В	
Мінімальна вхідна напруга, $U_{ВХМІН}$, В	
Максимальна вхідна напруга, $U_{ВХМАХ}$, В	
Потужність навантаження, P_H , Вт	

4. Розрахунок стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації:

- результати вибору типу ІМС за величиною $U_{ВИХ}$;
- результати перевірки ІМС за напругою;
- результати перевірки на не перевищення допустимого значення потужності, що розсіюється ІМС;
- рисунок 1 - Схема електрична принципова стабілізатора з фіксованою напругою стабілізації.

5. Розрахунок універсального стабілізатора на ІМС КР142ЕН12А:

- результати перевірки ІМС за напругою;

- результати перевірки на не перевищення допустимого значення потужності, що розсіюється ІМС;
- результати визначення величини опорів резисторів діляника R_1, R_2 , яким задається значення вихідної напруги стабілізатора;
- результати вибору кількості конденсаторів та діодів, їх типів та параметрів;
- рисунок 2 - Схема електрична принципова універсального стабілізатора на ІМС КР142ЕН12А.

6. Аналіз отриманих результатів та висновки.

Лабораторна робота

РОЗРАХУНОК ОДНОФАЗНОГО РЕГУЛЯТОРА ЗМІННОЇ НАПРУГИ

Мета роботи:

Набуття практичних навичок при розрахунках тиристорних регуляторів змінної напруги.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- призначення та основні параметри тиристорних регуляторів змінної напруги;
- методику розрахунку тиристорних регуляторів змінної напруги;

Ознайомитись з:

- теоретичним матеріалом за рекомендованою літературою [1, с. 208-212; 2, с. 345-356].

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- результати розрахунку однофазного регулятора змінної напруги;
- рисунок 1 – Принципова електрична схема однофазного регулятора змінної напруги;
- аналіз отриманих результатів та висновки

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 13».

1.2 Питання для самопідготовки

1. Поясніть призначення регуляторів змінної напруги.
2. Що є основою принципу роботи тиристорних регуляторів змінної напруги.

3. Наведіть схему однофазного регулятора змінної напруги та опишіть принцип його роботи.

4. Наведіть регулювальну характеристику однофазного регулятора змінної напруги і поясніть характер її залежності при лінійних змінах кута керування.

5. Поясніть призначення систем імпульсно-фазового керування (СІФК). Які види СІФК вам відомі.

6. Наведіть структурну схему і поясніть принцип роботи СІФК.

1.3 Рекомендована література

1. Квітка С.О. Електроніка та 164в.164провідного164іка: підручник / С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.

2. Колонтаєвський Ю.П. Промислова електроніка та мікросхемо-техніка: теорія і практикум / Ю.П. Колонтаєвський, А.Г. Сосков А.Г.; за 164в.164. А.Г. Соскова. – К.: Каравела, 2003. – 368 с.

2. Основні теоретичні відомості

Регулятори змінного струму є електронними ключами, що дозволяють вмикати або вимикати навантаження у колі змінного струму або регулювати потужність, що виділяється на навантаженні.

Регулятори можуть бути класифіковані залежно від способу керування, кількості фаз, схеми з'єднання, виду навантаження. Загальна класифікація регуляторів ґрунтується на способі керування та містить такі типи регуляторів:

- 1) електронний ключ типу контактора;
- 2) керований електронний ключ;
- 3) регульований електронний ключ.

Розглянемо кожен регулятор більш детально.

Електронний ключ типу контактора, як і електромеханічний контактор, призначений лише для вмикання або вимикання навантаження. Після вмикання напруга на навантаженні дорівнює напрузі мережі живлення.

Керований електронний ключ відрізняється від контактора тим, що для зниження величини перехідних струмів, які супроводжують процес вмикання, подача напруги на навантаження здійснюється поступово від нуля до значення

напруги мережі живлення. Таке регулювання здійснюється зменшенням кута керування від найбільшої величини до найменшої з попередньо встановленою швидкістю.

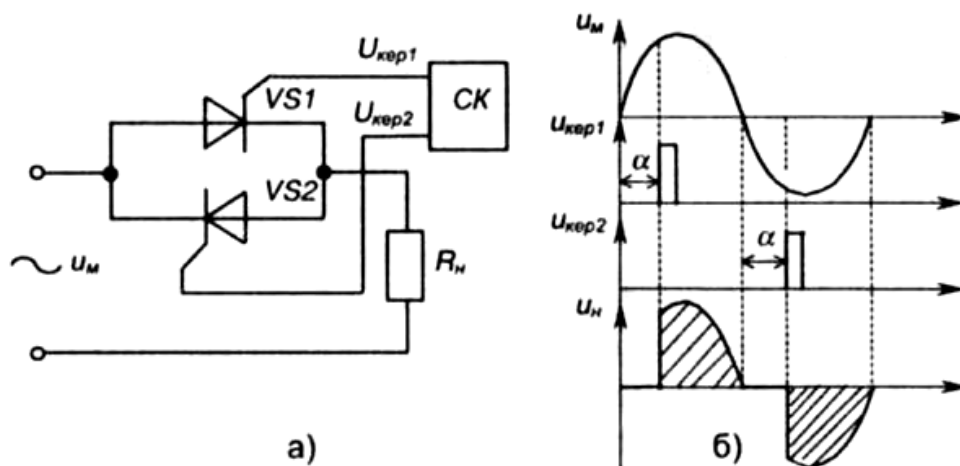
Регульований електронний ключ – це електронний тиристорний ключ, у якого може здійснюватися регулювання за необхідним законом кута керування, а, значить, і потужності, що віддається у навантаження. При цьому форма кривої напруги на навантаженні відрізняється від форми кривої мережі живлення, за рахунок чого, як й напруга, так й струм містять багато гармонік. Основна гармоніка має ту ж частоту, що й частота напруги живлення. Струм основної гармоніки відстає від напруги за фазою. Величина кута відставання залежить від виду навантаження і величини кута керування, але навіть за активного навантаження кут відставання не дорівнює нулю: пристрої з такими ключами завжди споживають реактивну потужність.

Слід відзначити, що регулятори всіх трьох типів мають одну й ту ж схему силового тиристорного вузла й відрізняються структурою системи керування, яка повинна реалізовувати потрібний закон зміни напруги на навантаженні.

В якості силових елементів у тиристорних регуляторах використовують тиристори, семістори та діоди. Із властивостей тиристора випливає, що сигнал керування вмикає регулятор напруги змінного струму практично без затримки, після чого струм у колі навантаження припиниться лише при переході його через нуль за умови відсутності при цьому сигналу керування.

Схема тиристорного регулятора та діаграми його роботи для навантаження наведені на рисунку 2.1.

Навантаження підключене до мережі живлення з напругою u_M за допомогою ключа, що за конструкцією є двома тиристорами: VS1 та VS2, які увімкненими зустрічно-паралельно.



а – електрична схема; б – часові діаграми роботи

Рисунок 2.1 – Однофазний тиристорний регулятор

Умовами протікання струму через тиристор є наявність на ньому прямої напруги й подачі напруги на керуючий електрод – напруги керування. Якщо її подача на тиристор здійснюється симетрично в обох напівперіодах, то напруга на навантаженні не має постійної складової. З часових діаграм, наведених на рисунку 2.1 видно, що, змінюючи кут керування тиристорів α від 0° до 180° , можна змінювати (регулювати) напругу на навантаженні від U_M до 0.

Через тиристор VS1 струм протікає під час додатного напівперіода, а через тиристор VS2 – під час від’ємного. Завдяки симетричності керування середнє I_a та діюче I_T значення струмів обох тиристорів однакові і становлять

$$I_a = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \frac{\sqrt{2}U_M}{R_H} \sin \vartheta d\vartheta = \frac{\sqrt{2}U_M}{2\pi R_H} (1 + \cos \alpha); \quad (1)$$

$$I_T = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_M}{R_H} \right)^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \vartheta d\vartheta} = \frac{U_M}{R_H} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)}, \quad (2)$$

де $\vartheta = \omega t = 2\pi f_M t$.

Діюче значення струму навантаження становить дорівнює

$$I_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\frac{\sqrt{2}U_M}{R_H} \right)^2 \int_{\alpha}^{\pi} \sin^2 \vartheta d\vartheta} = \frac{U_M}{R_H} \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi} \right)} = \sqrt{2} I_T, \quad (3)$$

Проектування силової схеми регулятора змінного струму є комплексною задачею, так, в режимі, що встановився, струм через тиристори та напруга на них мають квазістаціонарний характер.

При виборі вентилів переривача (наприклад, тиристорів) за струмом та напругою, втрати потужності в них визначають, виходячи з форми кривої струму, що протікає через напівпровідниковий прилад. Втрати у вентилі практично дорівнюють втратам від прямого струму. Графічні залежності, що мають назву характеристики керування, показують залежність від кута керування струмів окремих вентилів, діючих струму та напруги навантаження у режимі, що встановився.

Регулятори (переривачі) змінного струму у якості ключів типу контактора застосовують для керування нагрівальними приладами (печі опору, побутові електронагрівачі), для комутації одно- та трифазних електродвигунів.

Керовані електронні ключі можуть бути застосовані, наприклад, для повільного вмикання або вимикання освітлення театральної зали, для такого ж запуску електродвигуна із забезпеченням при цьому знижених значень пускових струмів.

Повністю керовані регулятори використовують в регуляторах (167В.167про-віднорах) напруги, для регулювання яскравості потужних джерел освітлення.

Розглянемо послідовність розрахунку однофазного тиристорного регулятора.

1. Визначення параметрів тиристорів:

- амплітуда зворотної напруги на тиристорі визначається за виразом

$$U_{am} = \sqrt{2} \cdot U_M \cdot K_3, \quad (1)$$

де K_3 – коефіцієнт запасу, що враховує можливі перенапруги; $K_3 = 1,25$;

- значення середнього струму, що протікає через тиристор, при $\alpha = 0$ визначається з виразом

$$I_{a0} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_M}{R_H \cdot \pi}; \quad (2)$$

- амплітудне значення струму, що протікає через тиристор, визначається за виразом

$$I_{am} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_M}{R_H}. \quad (3)$$

2. Умови вибору тиристора

$$U_{\Pi} > U_{am}, \quad (4)$$

$$I_{r0} > I_{a0}, \quad (5)$$

де U_{Π} – допустима напруга на тиристорі, що повторюється (амплітудне значення);

I_{a0} – середнє значення допустимого граничного струму тиристора з типовим охолоджувачем в умовах природного повітряного охолодження.

Вибір тиристорів та їх параметрів здійснюється за даними таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Основні параметри тиристорів типу T10

Параметр	Тип тиристора						Умови режиму
	T10 -10	T10 -16	T10 -25	T10 -40	T10 -63	T10 -80	
Допустима напруга на тиристорі, що повторюється, U_{Π}, B	50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200						—
Граничний струм (середнє значення) $I_{Г}, A$	10	16	25	40	63	80	Штучне охолодження; температура корпусу $85^{\circ}C$
Граничний струм з типовим охолоджувачем (середнє значення), $I_{Г0}, A$	8	10	12	14	20	25	Охолодження природне повітряне; температура оточуючого середовища $25^{\circ}C$
Ударний струм, $I_{уд}, A$	240	400	600	960	1300	1500	Тривалість імпульсу струму 10 мс
Порогова напруга, U_0, B	1,64	1,44	1,26	1,16	1,09	1,02	—
Динамічний опір у відкритому стані, $R_{д}, МОм$	10	7	6,4	4,4	1,8	1,7	—
Відмикаючий струм керування, $I_{к}, A$, не більше	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	При прямій напрузі на тиристорі

Продовження таблиці 2.1

Параметр	Тип тиристора						Умови режиму
	T10 -10	T10 -16	T10 -25	T10 -40	T10 -63	T10 -80	
Відмикаюча напруга керування U_K, B , не більше	3	3	3	4	4	4	—
Загальний встановлений тепловий опір, $R_T, ^\circ C/W$	5,9	5,3	4,9	3,69	3,5	3,4	З типовим охолоджувачем при природному повітряному охолодженні

3. Визначення середнього значення струму через тиристор при заданому значенні кута керування α за виразом

$$I_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{2\pi \cdot 7,5} \cdot (1 + \cos \alpha). \quad (6)$$

4. Визначення значення діючого струму тиристора для кута керування α за виразом

$$I_a = \frac{380}{7,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin \alpha}{2\pi} \right)}. \quad (7)$$

Примітка. В формулі значення кута керування α наведено в радіанах, то при використанні для розрахунків калькулятора, слід здійснити переведення значення кута в радіани, при цьому на калькуляторі необхідно встановити режим обчислень «Радіан».

5. Визначення коефіцієнту форми струму тиристора за виразом

$$F_i(\alpha) = \frac{I_m}{I_a} = \frac{\pi \sqrt{1 + \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{1 + \cos \alpha}; \quad (8)$$

Результати розрахунку залежності коефіцієнту форми струму тиристора від кута керування представити в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт форми струму тиристора для різних значень кута керування

Кут керування α , град.	0	30	60	90	120	150	180
Коефіцієнт форми, $F_i(\alpha)$							

За результатами розрахунків побудувати графічну залежність коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування: $F_i(\alpha) = f(\alpha)$.

6. Визначення діючого значення струму навантаження для кута керування за виразом

$$I_H = \sqrt{2} \cdot I_T. \quad (9)$$

7. Визначення діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування за виразом

$$U_H(\alpha) = I_H \cdot R_H = U_M \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}}. \quad (10)$$

Результати розрахунку діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування представити в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Діючі значення напруги на навантаженні за різних кутів керування

Кут керування, α , град.	0	30	60	90	120	150	180
Діюче значення напруги на навантаженні, $U_H(\alpha)$, В							
Відносне значення, $U_M/U_H(\alpha)$							

За результатами розрахунків побудувати залежність діючої напруги на навантаженні від величини кута керування: $U_H(\alpha) = f(\alpha)$.

8. Визначення потужності, що віддається у навантаження при заданому значенні кута керування за виразом

$$P_H = U_H \cdot I_H. \quad (11)$$

9. Визначення втрат потужності на тиристорі при заданому куті керування за виразом

$$\Delta P = U_0 \cdot I_a + R_d \cdot I_T^2. \quad (12)$$

10. Визначення температури перегріву тиристора при заданому куті керування за виразом

$$\Delta T = R_T \cdot \Delta P. \quad (13)$$

Визначення найбільшої температури напівпровідникової структури тиристора при температурі навколишнього середовища ($T_C = 25^\circ C$) за виразом

$$T_{max} = T_C + \Delta T; \quad (14)$$

при цьому

$$T_{max} < T_{max.don} = 140^\circ C,$$

де $T_{max.don}$ – максимально допустима температура нагріву кремнієвої напівпровідникової структури.

11. Визначення величини опору додаткового резистора у колі керування тиристора та вибір стандартного значення

$$R_{дод} = \frac{U_{ж} - U_K}{I_K}. \quad (15)$$

Стандартне значення $R_{дод} = \text{_____} \text{ Ом.}$

12. Визначення потужності, що розсіюється в додатковому резисторі, за виразом

$$P_{дод} = R_{дод} \cdot I_K^2. \quad (16)$$

13. Вибір додаткового резистора та його параметрів.

14. Схема електрична принципова однофазного регулятора змінної напруги наведена на рисунку 2.2.

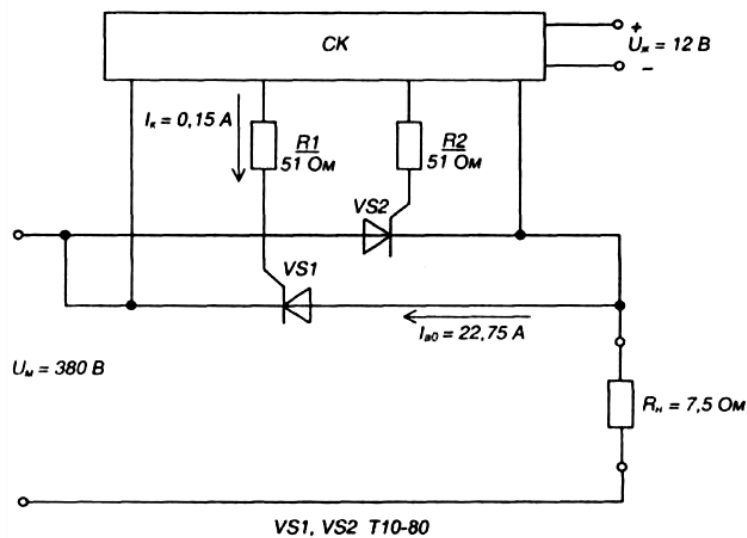


Рисунок 2.2 – Схема електрична принципова однофазного регулятора змінної напруги

Приклад розрахунку однофазного регулятора змінної напруги

Вихідні дані для розрахунку:

- діюче значення напруги мережі живлення, $U_M = 380 \text{ B}$;
- опір навантаження, $R_H = 7,5 \text{ Ом}$;
- кут керування тиристора, $\alpha = 45^\circ$;
- частота мережі живлення, $f_M = 50 \text{ Гц}$;
- напруга живлення системи керування тиристора, $U_{\text{ж}} = 12 \text{ B}$;
- охолодження тиристорів – повітряне природне;
- температура оточуючого середовища, $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- рекомендований тип тиристора – Т10.

Результати розрахунків:

1. Визначення параметрів тиристорів:

- амплітуда зворотної напруги на тиристорі за виразом (1)

$$U_{am} = \sqrt{2} \cdot U_M \cdot K_3,$$

$$U_{am} = \sqrt{2} \cdot 380 \cdot 1,25 = 669,75 \text{ B};$$

- значення середнього струму, що протікає через тиристор, при $\alpha = 0$ з виразом (2)

$$I_{a0} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_M}{R_H \cdot \pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5 \cdot \pi} = 22,75 \text{ A}.$$

- амплітудне значення струму, що протікає через тиристор, за виразом (3)

$$I_{am} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_M}{R_H} = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{7,5} = 71,44 A.$$

2. Умови вибору тиристора та його параметрів за виразами (4) та (5)

$$U_{II} > U_{am};$$

$$I_{r0} > I_{a0}.$$

За даними таблиці таблиці 2.1 обираємо тиристор типу Т10-80, що має наступні параметри:

$$U_{II} = 700 B > U_{am} = 669,75 B;$$

$$I_{r0} = 25 A > I_{a0} = 22,75 A;$$

- вмикаючий струм керування, $I_K = 0,15 A$;

- вмикаюча напруга керування, $U_K = 4 B$;

- порогова напруга, $U_0 = 1,02 B$;

- динамічний опір у відкритому стані, $R_d = 1,7 \cdot 10^{-3} Ом$;

- встановлений тепловий опір, $R_T = 3,4 ^\circ C/Bm$.

3. Визначення середнього значення струму через тиристор при заданому значенні кута керування α за виразом (6)

$$I_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{2\pi \cdot 7,5} \cdot (1 + \cos \alpha);$$

$$I_a = \frac{\sqrt{2} \cdot 380}{2\pi \cdot 7,5} \cdot (1 + \cos 45^\circ) = 19,42 A.$$

4. Визначення значення діючого струму тиристора для кута керування α за виразом (7)

$$I_a = \frac{380}{7,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin \alpha}{2\pi} \right)};$$

$$I_a = \frac{380}{7,5} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin 1,57}{2\pi} \right)} = 34,15 A.$$

5. Визначення коефіцієнту форми струму тиристора за виразом (8)

$$F_i(\alpha) = \frac{I_m}{I_a} = \frac{\pi \sqrt{1 + \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}}{1 + \cos \alpha};$$

$$F_i(\alpha) = \frac{I_m}{I_a} = \frac{\pi \sqrt{1 + \frac{0,785}{\pi} + \frac{\sin 1,57}{2\pi}}}{1 + \cos 0,785} = 1,76.$$

Результати розрахунку залежності коефіцієнту форми струму тиристора від кута керування представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Коефіцієнт форми струму тиристора для різних значень кута керування

Кут керування α , град.	0	30	60	90	120	150	180
Коефіцієнт форми, $F_i(\alpha)$							

За проведеними розрахунками та за даними таблиці 2.2 побудована графічна залежність коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування: $F_i(\alpha) = f(\alpha)$ – рисунок 2.3.

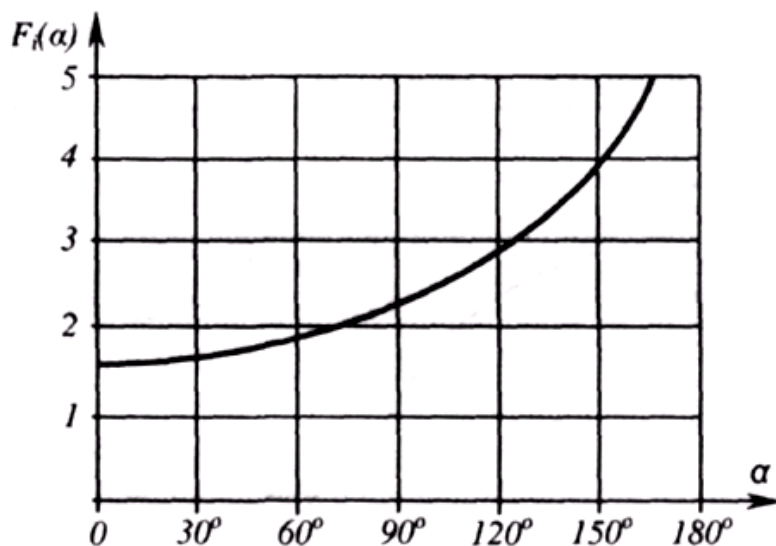


Рисунок 2.3 – Залежність коефіцієнта форми струму тиристора від величини кута керування

6. Визначення діючого значення струму навантаження для кута керування за

виразом (9)

$$I_H = \sqrt{2} \cdot I_T;$$

$$I_H = \sqrt{2} \cdot 34,15 = 48,15 A.$$

7. Визначення діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування за виразом (10)

$$U_H(\alpha) = I_H \cdot R_H = U_M \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\alpha}};$$

$$U_H(\alpha) = 48,15 \cdot 7,5 = 361,13 B.$$

Результати розрахунку діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування представлені в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Діючі значення напруги на навантаженні за різних кутів керування

Кут керування, α , град.	0	30	60	90	120	150	180
Діюче значення напруги на навантаженні, $U_H(\alpha)$, B							
Відносне значення, $U_M/U_H(\alpha)$							

За проведеними розрахунками та за даними таблиці 2.3 побудована залежність діючої напруги на навантаженні від величини кута керування: $U_H(\alpha) = f(\alpha)$ – рисунок 2.4.

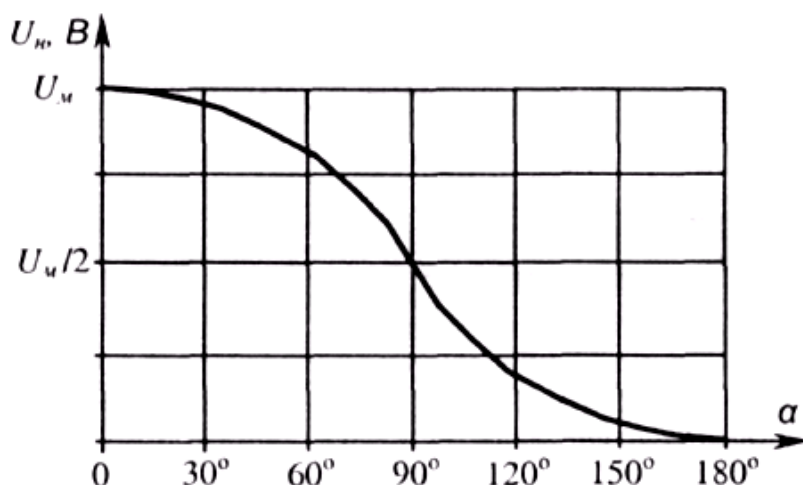


Рисунок 2.4 – Залежність діючої напруги на навантаженні від кута керування

Аналіз графічної залежності (див. рисунок 2.4) показав, що найефективніше регулювання величини напруги на навантаженні тиристорного регулятора є при значеннях кута керування від 30° до 150° .

8. Визначення потужності, що віддається у навантаження при заданому значенні кута керування за виразом (11)

$$P_H = U_H \cdot I_H;$$

$$P_H = 361,13 \cdot 48,15 = 17,4 \text{ кВт}.$$

9. Визначення втрат потужності на тиристорі при заданому куті керування за виразом (12)

$$\Delta P = U_0 \cdot I_a + R_d \cdot I_T^2;$$

$$\Delta P = 19,42 \cdot 1,02 + 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 34,12^2 = 21,78 \text{ Вт}.$$

10. Визначення температури перегріву тиристора при заданому куті керування за виразом (13)

$$\Delta T = R_T \cdot \Delta P;$$

$$\Delta T = 3,4 \cdot 21,78 = 74,05^\circ \text{C}.$$

Визначення найбільшої температури напівпровідникової структури тиристора при температурі навколишнього середовища ($T_C = 25^\circ \text{C}$) за виразом (14)

$$T_{max} = T_C + \Delta T;$$

$$T_{max} = 25 + 74,05 = 99,05^{\circ}C.$$

при цьому

$$T_{max} = 99,05^{\circ}C < T_{max.dop} = 140^{\circ}C,$$

де $T_{max.dop}$ – максимально допустима температура нагріву кремнієвої напівпровідникової структури.

11. Визначення величини опору додаткового резистора у колі керування тиристора за виразом (15) та вибір стандартного значення

$$R_{дод} = \frac{U_{ж} - U_{к}}{I_{к}};$$

$$R_{дод} = \frac{12 - 4}{0,15} = 53,53 \text{ Ом}.$$

Обираємо резистор типу С2-33 зі стандартним значенням опору 51 Ом.

12. Визначення потужності, що розсіюється в додатковому резисторі, за виразом (16)

$$P_{дод} = R_{дод} \cdot I_{к}^2;$$

$$P_{дод} = 51 \cdot 0,15^2 = 1,15 \text{ Вт}.$$

13. Вибір додаткового резистора та його параметрів.

Обираємо резистор типу С2-33 зі стандартним значенням опору 51 Ом та потужністю 2 Вт.

4. Вихідні дані для розрахунків

Вихідні дані для розрахунків однофазного регулятора змінної напруги наведені в таблиці 4.1.

При виборі варіантів слід використовувати:

- для варіантів завдань, що відповідають десяткам числа номеру варіанту, який надає викладач, обираються вихідні дані для розрахунку: частота мережі живлення, f_m , Гц, кут керування тиристорів, α , град., напруга джерела живлення системи керування тиристорами, $U_{ж}$, В;
- для варіантів завдань, що відповідають одиницям числа номеру варіанту, який надає викладач, обираються вихідні дані для розрахунку: діюче значення напруги

мережі живлення, U_M, B , опір навантаження, R_H, Ω .

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку однофазного регулятора

Вихідні дані для розрахунків		Номер варіанту									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
–	U_M, B	127	220	380	660	127	220	380	660	220	380
$f_M, \text{Гц}$	–	50									
–	R_H, Ω	6,3	10	18	30	3,1	5,1	9,1	15	4,7	8,2
$\alpha, \text{град.}$	–	10	20	35	40	50	65	70	80	95	100
$U_{ж}, B$	–	9	12	15	17	9	10	12	17	9	12

5. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.
2. Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунків згідно варіанту

Вихідні дані	Значення
Варіант	
Діюче значення напруги мережі живлення, U_M, B	
Опір навантаження, R_H, Ω	
Частота мережі живлення, $f_M, \text{Гц}$	
Кут керування тиристорів, $\alpha, \text{град.}$	
Напруга джерела живлення системи керування тиристорами, $U_{ж}, B$	
Охолодження тиристорів	повітряне природне
Тип тиристорів	T10



3. Рисунок 1 - Схема однофазного тиристорного регулятора

4. Результати визначення та вибору:

- амплітуди зворотної напруги на тиристорі;
- значення середнього струму, що протікає через тиристор, при $\alpha = 0$;
- амплітудного значення струму, що протікає через тиристор;
- результати вибору тиристора та його параметрів за умовами;
- середнього значення струму через тиристор при заданому значенні кута керування α ;
- значення діючого струму тиристора для кута керування α ;
- коефіцієнту форми струму тиристора та побудова залежності коефіцієнту форми струму тиристора від кута керування;
- діючого значення струму навантаження для кута керування α ;
- діючої напруги на навантаженні залежно від кута керування α та побудова залежності діючої напруги на навантаженні від величини кута керування;
- потужності, що віддається у навантаження при заданому значенні кута керування α ;
- втрат потужності на тиристорі при заданому куті керування α ;
- температури перегріву тиристора при заданому куті керування α та найбільшій температурі напівпровідникової структури тиристора при температурі навколишнього середовища;
- величини опору додаткового резистора у колі керування тиристора та вибору стандартного значення опору додаткового резистора;
- потужності, що розсіюється в додатковому резисторі;
- вибору додаткового резистора та його параметрів.

5. Аналіз отриманих результатів та висновки.

Лабораторна робота
РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДСИЛЮВАЧІВ
ЕЛЕКТРИЧНИХ СИГНАЛІВ

Мета роботи:

Придбання практичних навичок при розрахунках підсилювальних каскадів попереднього підсилення низькочастотних сигналів на біполярних транзисторах.

1. Вказівки та завдання для самостійної підготовки до роботи

1.1 Завдання для самостійної підготовки

Вивчити:

- призначення, принцип роботи і основні параметри підсилювачів на біполярних транзисторах;

Ознайомитись з:

- теоретичним матеріалом за рекомендованою літературою [1, с. 104-116; 2, с. 268-278; 3, с. 6-16];
- методикою розрахунку підсилювального каскаду графоаналітичним методом.

Опрацювати зміст звіту, який наведений в робочому зошиті до лабораторної роботи:

- найменування лабораторної роботи;
- мета лабораторної роботи;
- результати розрахунку підсилювачів електричних сигналів на біполярних транзисторах;
- аналіз отриманих результатів та висновки.

Сформований робочий зошит до лабораторної роботи необхідно роздрукувати та надати викладачу на перевірку й для захисту або надіслати електронний варіант робочого зошиту на Освітній портал ТДАТУ: навчальна дисципліна «Практична інженерна підготовка», розділ «Звіт до лабораторної роботи 14».

1.3 Питання для самопідготовки

1. Поясніть призначення підсилювачів.
2. Наведіть та схарактеризуйте основні параметри підсилювачів.

3. Поясніть призначення елементів підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером.
4. Поясніть, за якими параметрами здійснюється вибір біполярних транзисторів.
5. Поясніть, які елементи підсилювального каскаду визначають його режим роботи за постійним струмом?
6. Поясніть, якими способами забезпечується режим спокою в підсилювальних каскадах?
7. Поясніть принцип побудови лінії навантаження каскаду за постійним струмом.
8. Поясніть, яким чином вибирається положення робочої точки для режиму класу А?
9. Поясніть, як визначити параметри режиму спокою підсилювального каскаду (I_{BC} ; U_{BEC} ; I_{KC} ; U_{KEC})?
10. Поясніть, як визначити величини опорів резисторів R_{B1} і R_{B2} при заданому режимі спокою?
11. Поясніть принцип побудови лінії навантаження каскаду за змінним струмом.
12. Поясніть принцип побудови графіків зміни в часі струмів і напруги підсилювача при синусоїдальній вхідній напрузі на базі транзистора.
13. Поясніть, як визначити коефіцієнти підсилення за струмом, напругою і потужністю підсилювального каскаду?
14. Поясніть вплив від'ємного зворотного зв'язку на коефіцієнт підсилення і вхідний опір підсилювального каскаду.
15. Покажіть на вхідній і вихідних вольт-амперних характеристиках і лінії навантаження за постійним струмом зміну режиму роботи підсилювального каскаду на біполярному транзисторі:
 - а) при збільшенні опору резистора R_K в колі колектора;
 - б) при зменшенні опору резистора R_K в колі колектора;
 - в) при збільшенні напруги джерела живлення E_K ;

- г) при зменшенні напруги джерела живлення E_K ;
- д) при збільшенні опору резистора R_B в колі бази;
- е) при зменшенні опору резистора R_B в колі бази.

1.4 Рекомендована література

1. Квітка С.О. Електроніка та 182в.182провідного182іка: підручник / С.О. Квітка. – Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2019. – 223 с.
2. Квітка С.О. Електроніка та 182в.182провідного182іка: навчальний посібник / С.О. Квітка, В.Ф. Яковлєв, О.В. Нікітіна ; За 182в.182. Проф. В.Ф. Яковлєва. – К.: Аграрна освіта, 2010. – 329 с.
3. Електроніка та 182в.182провідного182іка: посібник для виконання лабораторних і практичних занять / С.О. Квітка, Ю.М. Федюшко, Н.Г. Косуліна, С.О. Мороз. – Х.: ФОП Мезіна В.В., 2017. – 244 с.

2. Основні теоретичні відомості

На рисунку 2.1 наведена схема електрична принципова підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером.

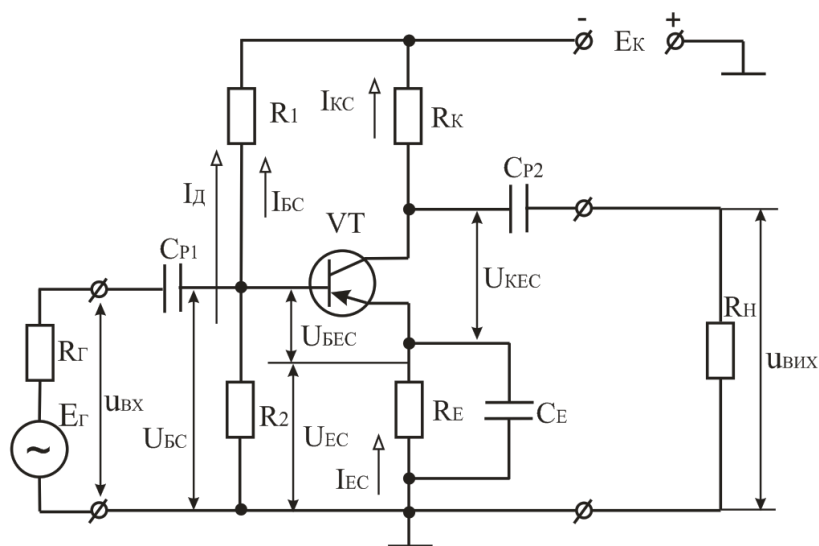


Рисунок 2.1 – Схема електрична принципова підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером

Основними елементами схеми є джерело живлення E_K , керований елемент – транзистор VT і резистор R_K . Ці елементи утворюють головне коло підсилювального каскаду, в якому за рахунок протікання в колі бази керованого колекторного струму утворюється підсилена змінна напруга на виході схеми, інші елементи виконують допоміжну роль.

Конденсатори C_{P1} , C_{P2} є 183В.183провідног. Конденсатор C_{P1} виключає шунтування вхідного кола каскаду колом джерела вхідного сигналу за постійним струмом. Функція конденсатора C_{P2} зводиться до пропускання у коло навантаження змінної складової напруги і затримання постійної складової.

Резистори R_{B1} , R_{B2} використовуються для задання режиму спокою каскаду. Оскільки біполярний транзистор керується струмом, то струм спокою (в даному випадку струм I_{KC}) утворюється заданням відповідної величини струму бази спокою I_{BC} . Резистор R_{B1} призначений для утворення кола протікання струму I_{BC} . Спільно з R_{B2} резистор R_{B1} забезпечує початкову напругу на базі U_{BC} відносно затиску «+ E_K » джерела живлення.

При забезпеченні режиму роботи транзистора необхідно здійснити температурну стабілізацію положення робочої точки (зменшити вплив температури на початкове положення робочої точки). З цією метою в емітерне коло введений резистор R_E , на якому утворюється напруга від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) за постійним струмом U_{RE} . Для усунення ВЗЗ за змінним струмом за наявності вхідного змінного сигналу резистор R_E шунтують конденсатором C_E , опір якого на частоті сигналу повинен бути незначним.

Одним з основних етапів розрахунку підсилювального каскаду є вибір початкового режиму роботи транзистора і його стабілізація. У режимі спокою підсилювального каскаду, коли немає вхідного сигналу, потрібно вірно вибрати робочу точку транзистора, тобто значення струму спокою I_{KC} і напругу спокою U_{KES} . Стабілізація положення робочої точки є основною умовою забезпечення нормальної роботи каскаду і його високих якісних показників. Режим роботи транзистора вибирається за сімействами вхідних і вихідних характеристик. Він визначається призначенням каскаду, вимогою до його коефіцієнту корисної дії,

нелінійним спотворенням. Робоча точка обирається з урахуванням того, щоб значення напруги і струмів транзистора не перевищували максимально допустимої напруги на колекторі $U_{KE \text{ макс}}$, струму колектора $I_{K \text{ макс}}$, а також потужності розсіювання на колекторі транзистора $P_{K \text{ макс}}$.

У режимі підсилення класу A вибір робочої точки визначається величиною максимальної вихідної напруги каскаду.

У каскадах попереднього підсилення, де амплітуди сигналу невеликі, робочу точку можна вибирати так, щоб отримати необхідні величини параметрів транзистора. Після того, як робоча точка вибрана, потрібно забезпечити її параметри в реальній схемі за допомогою джерела живлення E_K , напруги зміщення і резисторів R_{B1} і R_{B2} , які забезпечують необхідний режим.

З методичної точки зору й з погляду на отримання правильних результатів розрахунків підсилювального каскаду слід проводити за допомогою аналітичних формул у поєднанні з графічними побудовами на вхідних і вихідних характеристиках транзистора. Розрахунок проводиться за такими етапами:

- етап 1: розрахунок підсилювального каскаду за постійним струмом;
- етап 2: розрахунок підсилювального каскаду за змінним струмом.

Розглянемо етапи розрахунку підсилювального каскаду більш детально.

Етап 1 – Розрахунок підсилювального каскаду за постійним струмом

Вихідні дані для розрахунку підсилювального каскаду:

- напруга живлення – E_K ;
- опір навантаження – R_H ;
- опір джерела вхідного сигналу – R_T ;
- тип транзистора.

Алгоритм розрахунку складається з:

1. Побудова вхідних і вихідних вольт-амперних характеристик.
2. Побудова на сімействі вихідних характеристик лінії максимально допустимої потужності згідно виразу

$$I_{K \text{ макс}} = P_{K \text{ макс}} / U_{KE \text{ макс}}. \quad (1)$$

5. Визначення величини резистора R_K з виразу

$$K_R \geq 1 + R_H / R_K, \quad (2)$$

де K_R – коефіцієнт, що враховує співвідношення опорів резисторів R_K і R_H ;

$K_R = (1,2 \dots 1,5)$ – для низькоомного навантаження ($R_H \leq 1 \text{ кОм}$);

$K_R = (1,5 \dots 5,0)$ – для високоомного навантаження ($R_H > 1 \text{ кОм}$),

тому

$$R_K = \frac{R_H}{K_p - 1}. \quad (3)$$

4. Визначення величини опору резистора R_E за виразом

$$R_E = (0,1 \dots 0,5) R_K, \quad (4)$$

слід відзначити, чим більше значення R_E , тим глибше від'ємний зворотний зв'язок за постійним струмом і, отже, термостабільність схеми буде краще.

5. Визначення величини ємностей конденсаторів за умов

$$1/\omega C_{P1} \ll R_{\Gamma}, \quad 1/\omega C_{P2} \ll R_H, \quad 1/\omega C_E \ll R_E. \quad (5)$$

6. Побудова за двома точках на вихідних характеристиках лінії навантаження за постійним струмом, а саме:

- перша точка A : $I_K = 0$; $U_{KE} = E_K$;

- друга точка B : $I_K = E_K / (R_K + R_E)$; $U_{KE} = 0$.

Розглянемо детальну рекомендацію.

Для режиму класу A робочу точку необхідно обирати так, щоб відхилення робочої точки не заходили в область відтинання або в область нелінійної частини вольт-амперної характеристики.

Тому положення робочої точки $П$ слід обирати посередині прямої навантаження (див.рисунок 2.2). При цьому для точки спокою $П$ необхідно визначити параметри режиму спокою, а саме, струм колектора спокою, I_{KC} ; напругу колектор-емітер спокою, U_{KEC} ; потужність розсіювання на колекторі, P_{KC} , за виразом

$$P_{KC} = U_{KEC} \cdot I_{KC}. \quad (6)$$

За потужністю розсіювання на колекторі транзистора режим допустимий, якщо $P_{KC} < P_{K \text{ макс.}}$.

7. Графічним способом за вихідною вольт-амперною характеристикою, що проходить через точку спокою Π , визначення струму бази спокою, I_{BC} , який також можна визначити за виразом

$$I_{BC} = I_{KC} / \beta. \quad (7)$$

8. Визначення графічним способом за вхідною вольт-амперною характеристикою напруги база-емітер спокою, U_{BEC} , яка відповідає струму бази спокою I_{BC} .

9. Визначення опору резисторів діляника напруги R_{B1} і R_{B2} , що забезпечують визначені параметри режиму спокою, за виразом

$$R_{B1} = (E_K - U_{BEC} - U_{EC}) / (I_{BC} + I_D) = (E_K - U_{BC}) / (I_{B\Pi} + I_D); \quad (8)$$

$$R_{B2} = (U_{BEC} + U_{EC}) / I_D = U_{B\Pi} / I_D, \quad (9)$$

де I_D – струм діляника напруги, який дорівнює

$$I_D = (2 \dots 5) \cdot I_{BC}. \quad (10)$$

Етап 2 – Розрахунок підсилювального каскаду за змінним струмом

Алгоритм розрахунку складається з:

1. Побудова лінії навантаження за змінним струмом. Для змінного струму резистор R_K є увімкненим паралельно резистору навантаження R_H , як висновок, загальний опір в колекторному колі транзистора зменшується та дорівнює

$$R_{H\sim} = R_K \parallel R_H = (R_K \cdot R_H) / (R_K + R_H). \quad (11)$$

Лінія навантаження за змінним струмом проходить через точку спокою Π . Положення другої точки Γ визначається на перетині лінії навантаження з віссю колекторного струму згідно виразів

$$I_{K\sim} = U_{KEC} / R_{H\sim}; \quad (12)$$

$$U_{KE} = 0; I_K = I_{KC} + I_{K\sim}.$$

2. На вхідній вольт-амперній характеристиці в межах її лінійної ділянки відкладається розмах синусоїдальної напруги U_{BXm} відносно точки спокою. За граничними змінами U_{BXm} на вхідній характеристиці визначається амплітудне значення вхідного струму транзистора I_{BXm} .

3. Визначення амплітудного значення колекторного струму транзистора за виразом

$$I_{Km} = \beta \cdot I_{Bxm}. \quad (13)$$

4. Визначення за вихідною вольт-амперною характеристикою й лінією навантаження за змінним струмом амплітуди вихідної напруги за виразом

$$U_{BIXm} = U_{KE m}. \quad (14)$$

5. Побудова графіків зміни в часі струмів і напруги підсилювача при синусоїдальній вхідній напрузі на базі транзистора.

6. Визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою K_U , за струмом K_I й потужністю K_P без урахування вхідного струму, що протікає через опори R_{B1} і R_{B2} ділника напруги і з урахуванням падіння напруги на опорі R_Γ джерела вхідного сигналу

$$K_U = U_{BIXm} / U_{Bxm}; \quad K_I = I_{Hm} / I_{Bxm}; \quad K_P = K_U \cdot K_I, \quad (15)$$

де $I_{Hm} = U_{BIXm} / R_H$.

7. Визначення вхідного струму каскаду за виразом

$$I_{BxK} = E_\Gamma / (R_\Gamma + R_{BxK}), \quad (16)$$

де R_{BxK} – вхідний опір каскаду, який дорівнює $R_{BxK} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel R_{BxT}$;

R_{BxT} – вхідний опір транзистора, який дорівнює $R_{BxT} = \Delta U_{BE} / \Delta I_B$;

ΔU_{BE} і ΔI_B – приріст напруги і струму на робочій ділянці вхідної вольт-амперної характеристики.

Якщо режим роботи транзистора не змінювати, то

$$I_{BxKm} = I_{Bxm} + U_{Bxm} / (R_{B1} \parallel R_{B2}); \quad (17)$$

8. Визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою K_{UK} , за струмом K_{IK} й потужністю K_{PK} з урахуванням вхідного струму, що протікає через опори R_{B1} і R_{B2} і з урахуванням падіння напруги на опорі R_Γ джерела вхідного сигналу.

$$K_{UK} = U_{BIXm} / E_{\Gamma m}; \quad K_{IK} = I_{Hm} / I_{BxKm}; \quad K_{PK} = K_{UK} \cdot K_{IK}, \quad (18)$$

при цьому

$$E_{\Gamma m} = U_{Bxm} + I_{BxKm} \cdot R_\Gamma. \quad (19)$$

9. Визначення впливу від'ємного зворотного зв'язку (ВЗЗ) на коефіцієнт підсилення і вхідний опір підсилювального каскаду. Зворотний зв'язок

призначений для поліпшення показників підсилювача, а також для підвищення стабільності коефіцієнту підсилення, який стає менш чутливим до зміни параметрів.

Для ВЗЗ можна записати, що

$$K_{U\,33} = K_U / (1 + \gamma K_U), \quad (20)$$

де K_U – коефіцієнт підсилення без зворотного зв'язку;

γ – коефіцієнт передачі ланки зворотного зв'язку.

Згідно схеми підсилювача (див. рисунок 2.1), резистором R_E здійснюється послідовний ВЗЗ за постійним струмом. При розмиканні кола конденсатора C_E з'являється ВЗЗ за змінним струмом, що приводить до зменшення коефіцієнта підсилення і збільшення вхідного опору згідно виразу

$$R_{BX\,33} = R_{BK} \cdot (1 + \gamma K_U). \quad (21)$$

Для заданої схеми підсилювача коефіцієнт зворотного зв'язку дорівнює

$$\gamma = R_E / R_{H\sim}. \quad (22)$$

Приклад розрахунку підсилювального каскаду

Вихідні дані для розрахунку підсилювального каскаду:

- напруга джерела живлення, $E_K = 16\text{ В}$;
- опір навантаження, $R_H = 0,51\text{ кОм}$;
- опір резистора в колі колектора, $R_K = 0,56\text{ кОм}$;
- опір джерела вхідного сигналу, $R_\Gamma = 220\text{ Ом}$;
- тип транзистора КТ312А.

Результати розрахунків:

1. Схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі представлена на рисунку 2.1.

2. На сімействі вихідних характеристик (див. рисунок 2.2) будується лінія максимально допустимої потужності за виразом (1)

$$I_{K\text{МАКС}} = \frac{P_{K\text{МАКС}}}{U_{KE\text{МАКС}}},$$

де $P_{K\text{МАКС}} = 225\text{ мВт}$; $U_{KE\text{МАКС}} = 15\text{ В}$ [2].

$$I_{KMAKC} = \frac{225}{15} = 15 \text{ мА}.$$

3. Визначення величини резистора R_E за виразом (4)

$$R_E = (0,1 \dots 0,5) \cdot R_K,$$

$$R_E = 0,1 \cdot 0,56 = 0,056 \text{ кОм}.$$

4. Побудова лінії навантаження за постійним струмом:

- перша точка A : $I_K = 0$; $U_{KE} = E_K = 16 \text{ В}$;

- друга точка B : $U_{KE} = 0$; $I_K = \frac{E_K}{R_K + R_E} = \frac{16}{0,56 + 0,056} = 26 \text{ мА}$.

Для режиму класу A робоча точка обирається посередині лінії навантаження.

5. Визначення параметрів режиму спокою: $I_{KC} = 13 \text{ мА}$; $U_{KEC} = 8 \text{ В}$, при цьому потужність розсіювання визначена за виразом (6) та дорівнює

$$P_{KC} = U_{KEC} \cdot I_{KC} = 8 \cdot 13 = 104 \text{ мВт},$$

а струм бази спокою визначений за виразом (7) та дорівнює

$$I_{BC} = I_{KP} / \beta = 13 / 32 = 0,4 \text{ мА};$$

за вхідною характеристикою визначено, що $U_{BEC} = 0,32 \text{ В}$.

6. Визначення величини опорів резисторів ділянки напруги за виразами (8) та (9), при цьому струм ділянки напруги визначений за виразом (10)

$$I_D = (2 \dots 5) \cdot I_{BC} = 3 \cdot 0,4 = 1,2 \text{ мА};$$

$$U_{EC} = R_E \cdot I_{EC} = R_E (I_{KC} + I_{BC}) = 0,056 \cdot (13 + 0,4) = 0,75 \text{ В};$$

$$R_{B1} = \frac{E_K - U_{BEC} - U_{EC}}{I_{BC} + I_D} = \frac{16 - 0,32 - 0,75}{0,4 + 1,2} = 9,33 \text{ кОм};$$

$$R_{B2} = \frac{U_{BEC} + U_{EC}}{I_D} = \frac{0,32 + 0,75}{1,2} = 0,89 \text{ кОм}.$$

7. Побудова лінії навантаження за змінним струмом.

Для змінного струму резистор R_K увімкнений паралельно резистору R_H , загальний опір колекторного кола при цьому зменшується, а визначається за виразом (11) та дорівнює

$$R_H \sim = \frac{R_K \cdot R_H}{R_K + R_H} = \frac{0,51 \cdot 0,56}{0,51 + 0,56} = 0,26 \text{ кОм}.$$

Лінія навантаження за змінним струмом проходить через точку спокою $П$ і точку $К$ (див. рисунок 2.2), положення якої визначається прирощеннями ΔU_{KE} и ΔI_K . Приймаємо $\Delta U_{KE} = 3 \text{ В}$, тому

$$\Delta I_K = \frac{\Delta U_{KE}}{R_H \sim} = \frac{3}{0,26} = 11,5 \text{ мА}.$$

8. На вхідний вольт-амперній характеристиці в межах лінійної ділянки відкладається розмах синусоїдальної напруги $U_{BXm} = 0,02 \text{ В}$ відносно точки спокою. За граничними змінами U_{BXm} визначається амплітудне значення вхідного струму $I_{Bm} = 0,25 \text{ мА}$. Визначення величини колекторного струму здійснюється за виразом (13)

$$I_{Km} = I_{Bm} \cdot \beta = 0,25 \cdot 32 = 8 \text{ мА}.$$

Побудовані графіки зміни в часі струмів і напруги підсилювача при синусоїдальній напрузі на базі транзистора – див. рисунок 2.2. За вихідною вольт-амперною характеристикою й за лінією навантаження за змінним струмом визначена амплітуда вихідної напруги: $U_{BIXm} = 2,5 \text{ В}$.

9. Визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за струмом, напругою і потужністю без урахування вхідного струму, що протікає через опори R_{B1} , R_{B2} й за урахуванням падіння напруги на опорі R_{Γ} джерела вхідного сигналу за виразами (15)

$$K_U = \frac{U_{BIXm}}{U_{BXm}} = \frac{2,5}{0,02} = 125;$$

$$K_I = \frac{I_{BIXm}}{I_{BXm}} = \frac{8}{0,25} = 32;$$

$$K_P = K_I \cdot K_U = 32 \cdot 125 = 4000.$$

10. Визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою, струмом і потужністю з урахуванням вхідного струму, що протікає через опори R_{B1} і R_{B2} й з урахуванням падіння напруги на опорі R_{Γ} джерела вхідного сигналу за виразами

$$R_{BX\ T} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{0,02}{0,25} = 80\ \Omega;$$

$$R_{BX} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2} \cdot R_{BX\ T}}{R_{B1} \cdot R_{B2} + R_{B1} \cdot R_{BX\ T} + R_{B2} \cdot R_{BX\ T}} = \frac{9,33 \cdot 0,89 \cdot 0,08}{9,33 \cdot 0,89 + 9,33 \cdot 0,08 + 0,89 \cdot 0,08} = 0,073\ \text{кОм};$$

$$I_{BXK} = E_{\Gamma} / (R_{\Gamma} + R_{BXK}) = 16 / (220 + 73) = 0,056\ \text{А};$$

$$I_{BXKm} = I_{BXm} + U_{BXm} / (R_{B1} \parallel R_{B2}) = 0,25 + 0,02 / [9,33 \cdot 0,89 / (9,33 + 0,89)] = 0,27\ \text{мА};$$

$$E_{\Gamma m} = U_{BXm} + I_{BXKm} \cdot R_{\Gamma} = 0,02 + 0,056 \cdot 220 = 12,34\ \text{В};$$

$$K_{UK} = U_{BIXm} / E_{\Gamma m} = 2,5 / 0,39 = 7;$$

$$K_{IK} = I_{BIXKm} / I_{BXKm} = 8 / 0,27 = 30;$$

$$K_{PK} = K_{UK} \cdot K_{IK} = 7 \cdot 30 = 210.$$

11. Визначення вхідного опору підсилювача, R_{BX33} , при введенні від'ємного зворотного зв'язку за виразом (21), при цьому коефіцієнт зворотного зв'язку, K_{U33} , визначається за виразом (20), а коефіцієнт передачі, γ , визначається за виразом (22)

$$\gamma = \frac{R_E}{R_{H\sim}} = \frac{0,056}{0,26} = 0,21;$$

$$K_{U33} = \frac{K_U}{1 + \gamma \cdot K_U} = \frac{125}{1 + 0,21 \cdot 125} = 4,6;$$

$$R_{BX33} = R_{BX} \cdot (1 + \gamma \cdot K_U) = 73 \cdot (1 + 0,21 \cdot 125) = 1989\ \Omega.$$

У схемі підсилювача за допомогою R_E здійснюється послідовний від'ємний зворотний зв'язок за постійним струмом. При розмиканні кола конденсатора C_E з'являється від'ємний зворотний зв'язок за змінним струмом, що приводить до зменшення вхідного опору.

3. Порядок виконання роботи

1. За варіантом, який студенту надає викладач, та за даними таблиці 4.1, що наведена в пункті 4 лабораторної роботи, записати вихідні дані для розрахунків – таблиця 1 звіту до лабораторної роботи.

2. Представити схему підсилювального каскаду, увімкненого за схемою із спільним емітером і пояснити призначення елементів каскаду – рисунок 1 звіту до лабораторної роботи.

3. Розрахувати підсилювальний каскад графоаналітичним методом:

- привести вхідну $I_B = f(U_{BE})$ й вихідну $I_K = f(U_{KE})$ вольт-амперні 192в.192провод-
ножки заданого біполярного транзистора – рисунок 2 звіту до лабораторної ро-
боти;
- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за постійним стру-
мом;
- визначити параметри режиму спокою: U_{KEC} , I_{KC} , U_{BEC} , I_{BC} ;

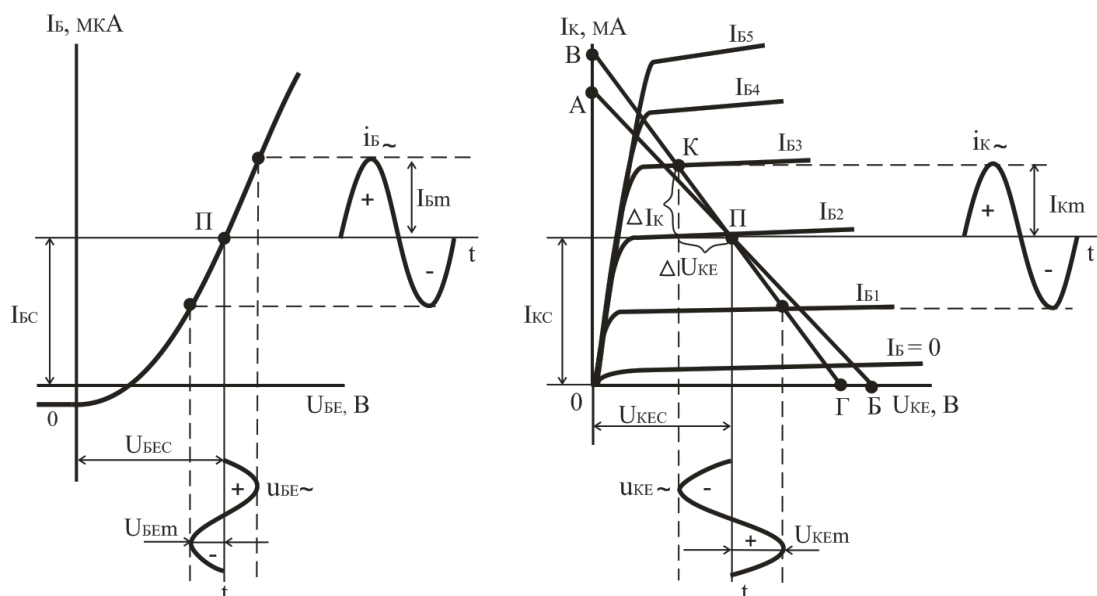


Рисунок 2.2

- визначити величини опорів резисторів R_{B1} і R_{B2} ;
- побудувати лінію навантаження підсилювального каскаду за змінним струмом;
- побудувати графіки зміни струмів бази I_B і колектора I_K , напруг колектор-емітер U_{KE} і база-емітер U_{BE} при синусоїдальній вхідній напрузі;
- визначити коефіцієнти підсилення каскаду за напругою K_U , струмом K_I і поту-
жністю K_P без урахування вхідного струму;

- визначити коефіцієнти підсилення каскаду за напругою, струмом і потужністю з урахуванням вхідного струму;
- визначити вхідний опір підсилювача, $R_{BX\ 33}$, при введенні від'ємного зворотного зв'язку.

4. Вихідні дані для розрахунків

Вихідні дані для розрахунків підсилювального каскаду наведені в таблиці 4.1.

При виборі варіантів слід використовувати:

- для варіантів завдань, що відповідають десяткам числа номеру варіанту, який надає викладач, обираються вихідні дані для розрахунку: тип транзистора; опір джерела вхідного сигналу, R_G , Ом;
- для варіантів завдань, що відповідають одиницям числа номеру варіанту, який надає викладач, обирається вихідні дані для розрахунку: напруга живлення, E_K , В; опір резистора в колі колектора, R_K , Ом; опір навантаження, R_H , Ом.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку підсилювального каскаду

Вихідні дані для розрахунків		Номер варіанту									
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
десятки	одиниці										
	$E_K, В$	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
	$R_K, Ом$	330	390	470	560	680	820	1000	1100	1200	1500
	$R_H, Ом$	100	240	430	510	680	820	1200	1500	1800	2200
$R_G, Ом$		100	220	330	470	510	630	750	1000	1200	1500
Тип транзистора		КТ312В	КТ312А	КТ312Б	КТ315	КТ312В	КТ312А	КТ312Б	КТ315	КТ312Б	КТ315

5. Зміст звіту

1. Найменування лабораторної роботи.
2. Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунків згідно варіанту

Вихідні дані	Значення
Варіант	
Тип транзистора	
Опір джерела вхідного сигналу, R_{Γ} , Ом	
Напруга живлення, E_K , В	
Опір резистора в колі колектора, R_K , Ом	
Опір навантаження, R_H , Ом	



3.Рисунок 1 – Схема підсилювального каскаду на біполярному транзисторі, увімкненого за схемою із спільним емітером



4. Рисунок 2 - Вхідна $I_B = f(U_{BE})$ й вихідна $I_K = f(U_{KE})$ вольт-амперні характеристики заданого біполярного транзистора

4. Результати розрахунку підсилювального каскаду графоаналітичним методом:

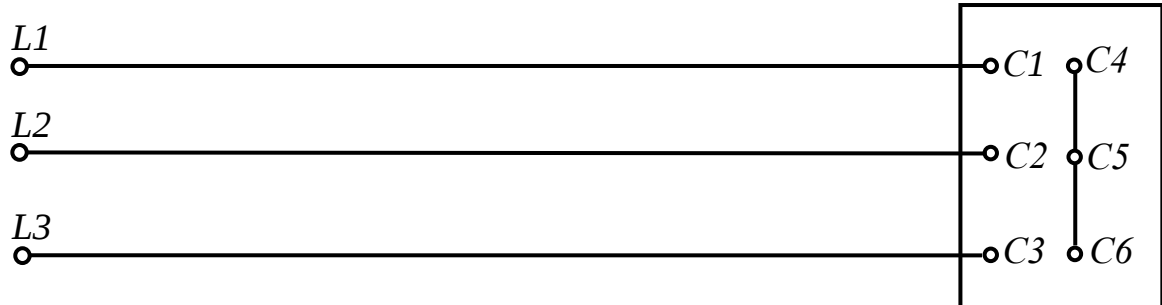
- лінія навантаження підсилювального каскаду за постійним струмом;
- результати визначення параметрів режиму спокою: U_{KEC} , I_{KC} , U_{BEC} , I_{BC} ;
- результати визначення величин опорів резисторів R_{B1} і R_{B2} ;
- лінія навантаження підсилювального каскаду за змінним струмом;
- графіки зміни струмів бази I_B і колектора I_K , напруг колектор-емітер U_{KE} і база-емітер U_{BE} при синусоїдальній вхідній напрузі;
- результати визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою K_U , струмом K_I і потужністю K_P без урахування вхідного струму;
- результати визначення коефіцієнтів підсилення каскаду за напругою, струмом і потужністю з урахуванням вхідного струму;
- результати визначення вхідного опору підсилювача, R_{BX33} , при введенні від'ємного зворотного зв'язку.

5. Аналіз отриманих результатів та висновки.

Додаток А.1

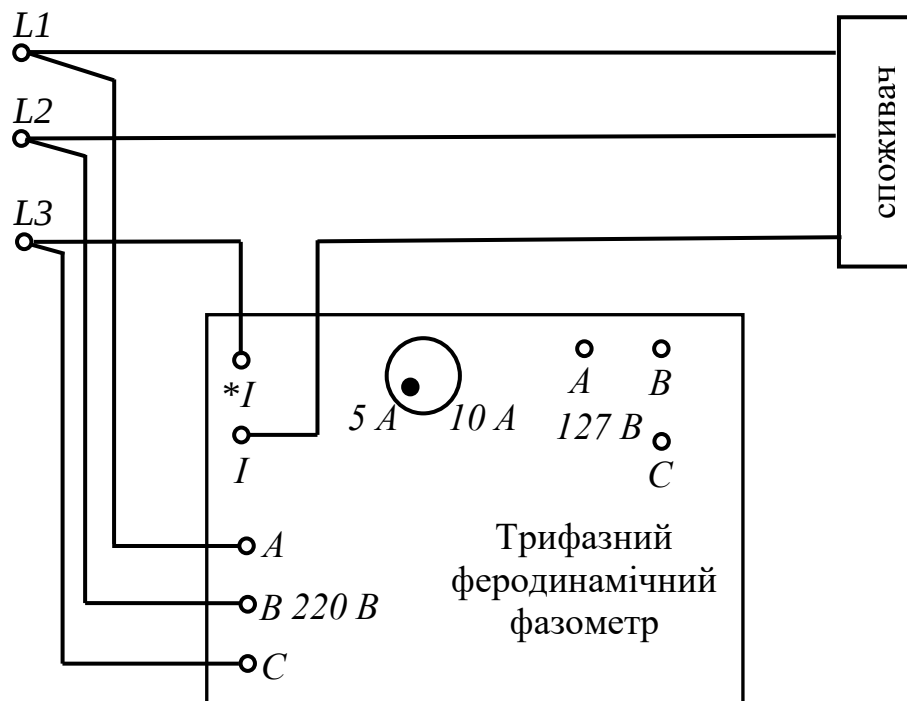
Схема підключення клемної панелі асинхронного електродвигуна

клемна панель
асинхронного
електродвигуна



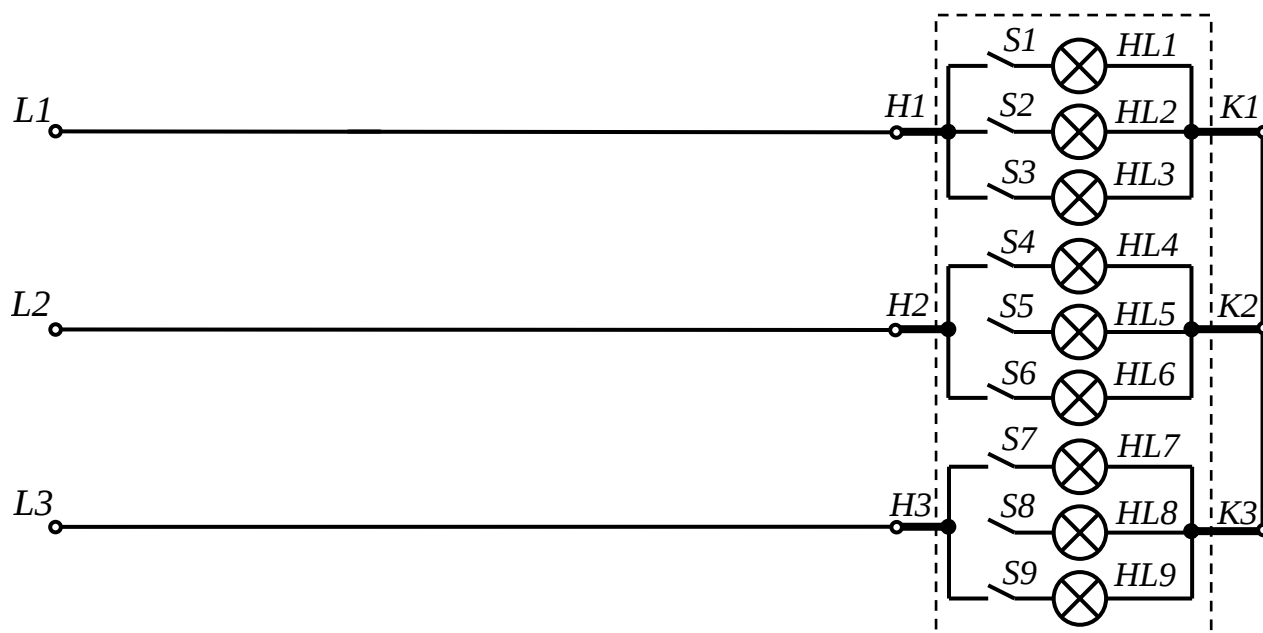
Додаток А.2

Схема підключення трифазного фазометра до трифазного трипровідного кола



Додаток А.3

Схема підключення електричного освітлювального навантаження та тумблерів



Додаток Б

Таблиця Б.1 – Паспортні дані силових трансформаторів

Номер варіанту	Тип силового трансформа- тора	S_n , кВА	Напруга	Напруга	Схема та група з'єднання	Втрати, Вт		$u_k\%$, %	$i_0\%$, %	d , м
			обмо- тки ВН U_{1n} , кВ	обмо- тки НН U_{2n} , кВ		P_o	$P_{к.н}$			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	ТМ 25/6	25	6	0,4	Y/Y _H -0	130	600	4,5	3,2	0,08
2	ТМ 25/10	25	10	0,4	Y/Z _H -11	135	690	4,7	3,2	0,08
3	ТМ 40/6	40	6	0,4	Y/Y _H -0	175	880	4,5	3,0	0,1
4	ТМ 40/10	40	10	0,4	Y/Z _H -11	190	1000	4,7	3,0	0,1
5	ТМ 63/10	63	10	0,4	Y/Y _H -0	240	1280	4,5	2,8	0,11
6	ТМ 100/6	100	6	0,4	Y/Y _H -0	330	1970	4,5	2,6	0,12
7	ТМ 100/10	100	10	0,4	Y/Z _H -11	365	2270	4,7	2,6	0,12
8	ТМ 100/35	100	35	0,4	Y/Y _H -0	465	1970	6,5	2,6	0,12
9	ТМ 160/10	160	10	0,4	Y/Y _H -0	510	2650	4,5	2,4	0,16
10	ТМ 160/10	160	10	0,69	Δ/Y _H -11	565	3100	4,5	2,4	0,16
11	ТМ 250/10	250	10	0,4	Y/Y _H -0	740	3700	4,5	2,3	0,16
12	ТМ 250/35	250	35	0,4	Y/Y _H -0	900	3700	6,5	2,3	0,18
13	ТМ 400/10	400	10	0,4	Y/Y _H -0	950	5500	4,5	2,1	0,18
14	ТМ 400/10	400	10	0,69	Δ/Y _H -11	1050	5900	4,5	2,1	0,18
15	ТМ 630/10	630	10	0,4	Y/Y _H -0	1310	7600	5,5	2,0	0,2
16	ТМ 25/6	25	6	0,4	Y/Y _H -0	130	600	4,8	3,4	0,09
17	ТМ 40/6	40	6	0,4	Y/Y _H -0	175	880	4,8	3,2	0,11
18	ТМ 63/10	63	10	0,4	Y/Y _H -0	240	1280	4,8	3,0	0,12
19	ТМ 100/10	100	10	0,4	Y/Z _H -11	365	2270	4,9	2,8	0,13
20	ТМ 100/35	100	35	0,4	Y/Y _H -0	465	1970	6,8	2,8	0,13
21	ТМ 160/10	160	10	0,69	Δ/Y _H -11	565	3100	4,8	2,6	0,17

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
22	ТМ 250/35	250	35	0,4	Y/Y _H -0	900	3700	6,8	2,5	0,19
23	ТМ 400/10	400	10	0,4	Y/Y _H -0	950	5500	4,8	2,2	0,19
24	ТМ 400/10	400	10	0,69	Δ/Y _H -11	1050	5900	4,8	2,3	0,19
25	ТМ 630/10	630	10	0,4	Y/Y _H -0	1310	7600	5,8	2,2	0,21

Додаток Б

Додаток Б.2 - Рекомендовані значення магнітної індукції, B_c , $Tл$, в стрижнях силових трансформаторів

Марка сталі	Значення магнітної індукції, B_c , $Tл$	
	потужність трансформатора, S_n , кВ·А	
	25...100	160...630
3413, 3414	1,5...1,6 $Tл$	1,6...1,7 $Tл$

Додаток В

Таблиця В.1 - Вихідні дані для проведення досліджень

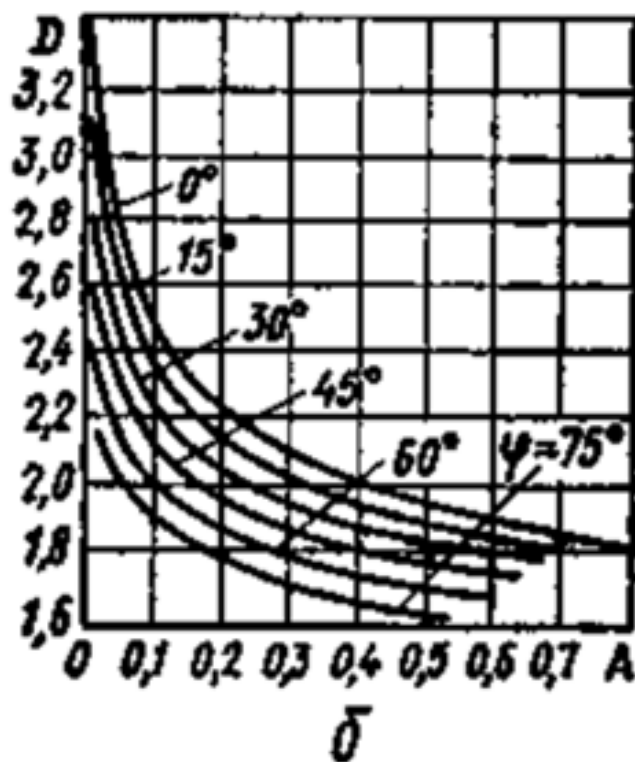
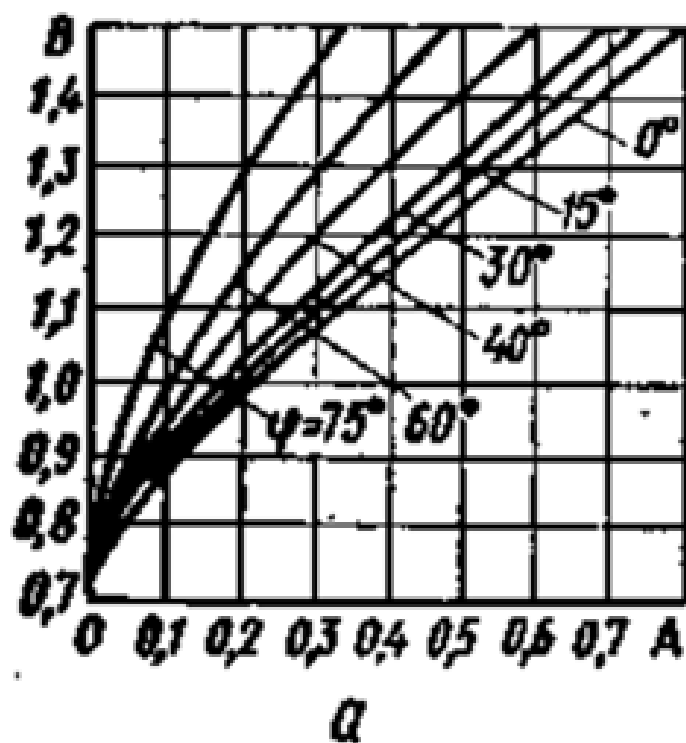
№ вар.	Тип АД	P_n , кВт	n_n , об/хв.	η_n , %	$\cos\varphi_n$, в.о.	U_n , В	$R_{1(20^\circ C)}$, Ом
1	5A80MB2Y1	2,2	2830	81	0,85	380	3,0
2	5A112M2Y2	7,5	2900	89	0,89	380	0,53
3	5A80MA6Y3	0,75	930	71	0,69	380	10,9
4	6A280S10Y2	37	590	93	0,78	380	0,086
5	5A80MA8Y1	0,37	700	59	0,62	380	11,2
6	5A112MB6Y3	4	950	82,5	0,81	380	1,52
7	5A225M2Y2	55	2950	93,5	0,91	380	0,042
8	5A112M4Y1	5,5	1450	87	0,85	380	0,995
9	5A160M4Y1	18,5	1450	90	0,86	380	0,197
10	5A160M8Y1	11	720	87	0,74	380	0,428
11	5A200M2Y2	37	2940	93,5	0,89	380	0,065
12	5A200M4Y3	37	1470	92,3	0,85	380	0,09
13	5A250S4Y1	75	1480	94,3	0,86	380	0,028
14	5A112MA6Y1	3	950	82	0,8	380	2,07
15	5A200L2Y3	45	2950	93,5	0,89	380	0,051
16	5A112MB8Y3	3	710	78	0,7	380	1,86
17	5A200M6Y3	22	975	90,5	0,83	380	0,193
18	5A200L6Y1	30	980	91,2	0,84	380	0,29
19	5A112MA8Y1	2,2	710	77	0,69	380	2,73
20	5A160M6Y2	15	975	88,5	0,84	380	0,346
21	5A160S8Y2	7,5	720	87	0,74	380	0,637
22	5A200L8Y3	22	730	91	0,8	380	0,195

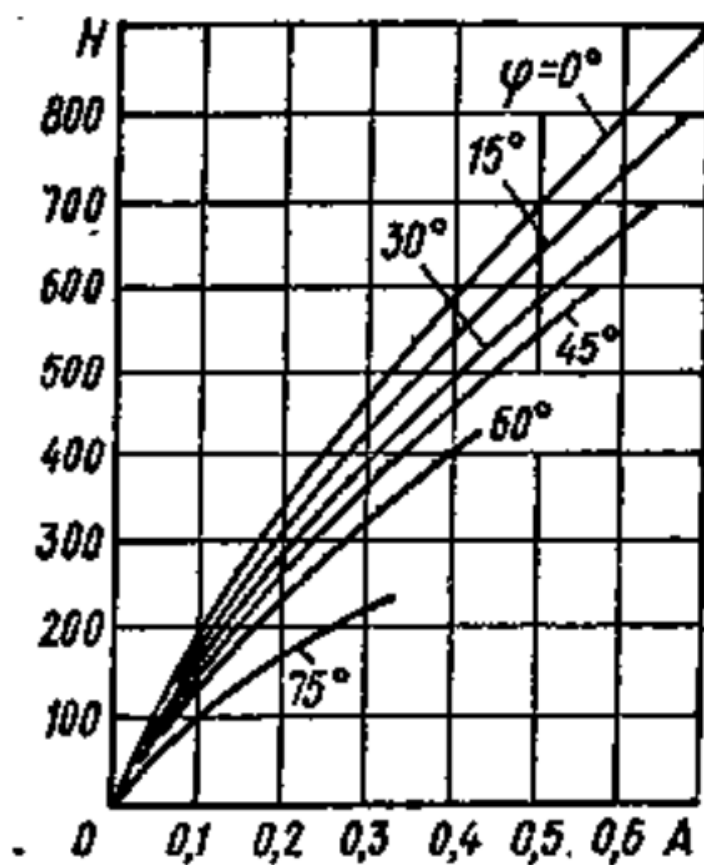
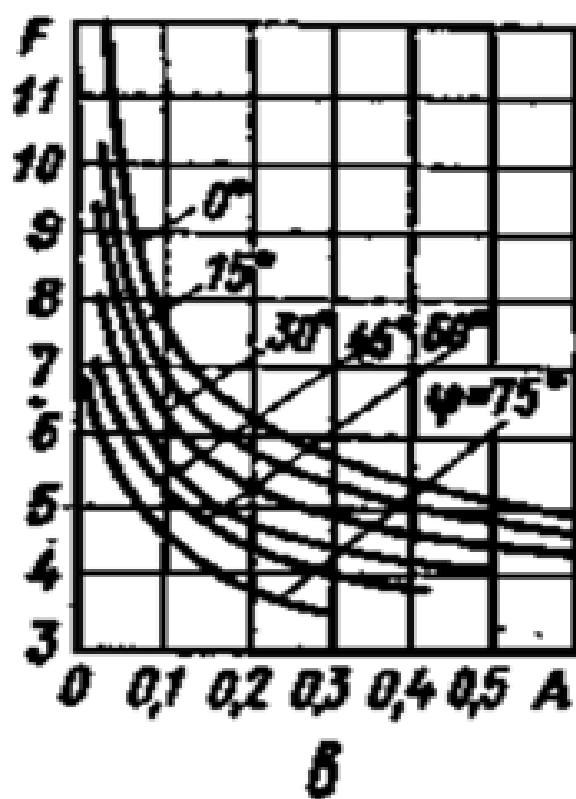
Таблиця В.2 - Вихідні дані для проведення досліджень

№ варіанту	Тип АД	$P_{\text{н}},$ кВт	$n_{\text{н}},$ об/хв.	$\eta_{\text{н}},$ %	$\cos\varphi_{\text{н}},$ в.о.	$U_{\text{н}},$ В	$R_{1(20^{\circ}\text{C})},$ Ом	$I_0,$ А	$P_0,$ кВт	$P_{\text{к}},$ кВт	$U_{\text{к}},$ В	$\mu_{\text{max}},$ в.о.
1	5A80MB2Y1	2,2	2830	81	0,85	380	3,0	1,9	0,15	0,3	83	2,2
2	5A112M2Y2	7,5	2900	89	0,89	380	0,53	4,52	0,357	0,75	67	2,2
3	5A80MA6Y3	0,75	930	71	0,69	380	10,9	1,42	0,112	0,33	153	2,2
4	6A280S10Y2	37,0	590	93	0,78	380	0,086	19,3	1,524	3,17	71	1,9
5	5A80MA8Y1	0,37	700	59	0,62	380	11,2	0,86	0,068	0,2	180	2,2
6	5A112MB6Y3	4,0	950	82,5	0,81	380	1,52	3,71	0,293	0,83	102	2,2
7	5A225M2Y2	55	2950	93,5	0,91	380	0,032	22,95	1,813	3,2	52	2,6
8	5A112M4Y1	5,5	1450	87	0,85	380	0,995	3,94	0,311	0,84	100	2,2
9	5A160M4Y1	18,5	1450	90	0,86	380	0,197	8,67	0,685	1,639	82	2,9
10	5A160M8Y1	11,0	720	87	0,74	380	0,428	6,94	0,548	1,69	103	2,4
11	5A200M2Y2	37,0	2940	93,5	0,89	380	0,055	15,4	1,22	2,31	58	2,8
12	5A200M4Y3	37,0	1470	92,3	0,85	380	0,08	14,51	1,146	3,0	56	2,7
13	5AM250S4Y1	75,0	1480	94,3	0,86	380	0,033	23,82	1,882	4,0	50	2,5
14	5A112MA6Y1	3,0	950	82	0,8	380	2,7	2,97	0,235	0,74	122	2,2
15	5A200L2Y3	45,0	2950	93,5	0,89	380	0,041	18,8	1,483	2,56	53	2,8
16	5A112MB8Y3	3,0	710	78	0,7	380	1,86	3,37	0,266	0,78	143	2,2
17	5A200M6Y3	22,0	975	90,5	0,83	380	0,193	10,4	0,92	2,26	83	2,4
18	5A200L6Y1	30,0	980	91,2	0,84	380	0,13	13,29	1,05	2,7	88	2,4
19	5A112MA8Y1	2,2	710	77	0,69	380	2,73	2,85	0,225	0,68	138	2,2
20	5A160M6Y2	15,0	975	88,5	0,84	380	0,246	8,63	0,682	2,03	103	2,7
21	5A160S8Y2	7,5	720	87	0,74	380	0,637	5,15	0,407	1,2	109	2,4
22	5A200L8Y3	22,0	730	91	0,8	380	0,195	12,06	0,953	2,6	83	2,3

Графічні залежності визначення допоміжних коефіцієнтів

B (a), D (δ), F (ϵ), H (z) за значенням коефіцієнта A





Критерії оцінювання лабораторних робіт

Кількісна оцінка здійснюється за наступними показниками:

- вхідний контроль (ВК) – **30%** від максимальної кількості балів за лабораторну роботу;
- підготовка та оформлення робочого зошиту (РЗ) для виконання поточної лабораторної роботи – **20%** від максимальної кількості балів за лабораторну роботу;
- захист лабораторної роботи (ЗЛР) – **50%** від максимальної кількості балів за лабораторну роботу.

Вхідний контроль здійснюється шляхом усного опитування студента на початку лабораторної роботи. Кількість балів за вхідний контроль визначається згідно пропорційній відповідності кількості вірно наданим відповідям на контрольні запитання.

Підготовка та оформлення робочого зошиту здійснюється студентом на лабораторному занятті. Кількість балів за виконання робочого зошиту нараховується викладачем при повному оформленні робочого зошиту.

Захист лабораторної роботи здійснюється шляхом письмового контролю (за 20 хвилин до закінчення заняття). Кількість балів за захист лабораторної роботи визначається згідно пропорційній відповідності кількості вірно розв'язаних контрольних завдань.

В цілому, лабораторна робота вважається виконаною та захищеною, якщо студент у підсумку отримав не менш, ніж 60% від максимального балу.

За умов отримання меншої кількості балів (менш, ніж 60%) студент зобов'язаний його відпрацювати під керівництвом викладача та захистити у час, який передбачений графіком консультацій викладача.

ТАВРІЙСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІМЕНІ ДМИТРА МОТОРНОГО

кафедра «Електротехніка і електромеханіка

імені професора В.В.Овчарова»

ПРАКТИЧНА ІНЖЕНЕРНА ПІДГОТОВКА

РОБОЧИЙ ЗОШИТ

ДЛЯ ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНОЇ РОБОТИ

на тему

Виконав, студент _____ групи _____
(підпис) (ПБ студента)

Мелітополь

20_____