


**Монтаж, налагодження та експлуатація  
електротехнічного обладнання:  
методичні вказівки до виконання  
лабораторних робіт**

Запоріжжя 2026



УДК 621.3.004.14 (072)  
М77

*Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол № 5 від 27 лютого 2026 р.)*

*Укладач*

Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук,

М77      Монтаж, налагодження та експлуатація електротехнічного обладнання : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / уклад. Ю. Ю. Шрамко. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 54 с.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Монтаж, налагодження та експлуатація електротехнічного обладнання».

Лабораторні роботи спрямовані на формування професійних компетентностей у сфері виконання електромонтажних операцій, проведення пусконаладжувальних випробувань, вимірювання електричних параметрів, аналізу технічного стану електротехнічного обладнання та оцінювання результатів його експлуатації в умовах підприємств гірничо-металургійного комплексу.

У методичних вказівках наведено мету та завдання кожної роботи, короткі теоретичні відомості, опис лабораторного обладнання й вимірювальних приладів, порядок виконання експериментальних досліджень, вимоги до оформлення звіту, приклади обробки результатів вимірювань, а також контрольні питання для перевірки рівня засвоєння матеріалу.

Видання призначене для використання під час проведення лабораторних занять і самостійної підготовки студентів з метою закріплення теоретичних знань, набуття практичних навичок роботи з електротехнічним обладнанням та підготовки до професійної діяльності у сфері монтажу, налагодження й експлуатації електроустановок.

УДК 621.3.004.14 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

## Зміст

ВСТУП .....	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ .....	5
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ .....	14
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РЕЖИМІ ХОЛОСТОГО ХОДУ .....	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4 ЦЕНТРУВАННЯ ВАЛІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МАШИНИ ТА ВИКОНАВЧОГО МЕХАНІЗМУ .....	35
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОМОНТАЖУ ЗА СХЕМАМИ ВТОРИННИХ З'ЄДНАНЬ .....	48



## ВСТУП


Лабораторні роботи є обов'язковою складовою підготовки фахівців електротехнічного та електромеханічного профілю, оскільки забезпечують перехід від теоретичних положень до практичних навичок монтажу, налагодження й експлуатації електротехнічного обладнання. У реальних умовах виробництва саме якість виконання монтажних операцій, правильність контрольних вимірювань і коректність пусконаладжувальних дій визначають рівень надійності, енергоефективності та безпеки роботи електроустановок. Тому виконання лабораторного практикуму спрямоване на формування системного уявлення про технологічну дисципліну робіт, вимоги нормативних документів і культуру інженерного аналізу результатів.

Методичні вказівки призначені для організації та виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Монтаж, налагодження та експлуатація електротехнічного обладнання». У межах практикуму здобувачі освіти опановують: підготовку робочого місця та технічної документації; виконання типових операцій електромонтажу; методи контролю стану ізоляції та заземлення; перевірку правильності електричних з'єднань і функціонування схем керування; діагностику типових відхилень і несправностей; базові прийоми оцінювання технічного стану електричних машин і апаратури. Окрема увага приділяється обґрунтованості прийнятих рішень, правильності вибору засобів вимірювання та інтерпретації отриманих даних.

Кожна лабораторна робота структурована таким чином, щоб забезпечити послідовне виконання завдань і контроль засвоєння матеріалу. Робота має мету роботи, основні теоретичні відомості, перелік обладнання та приладів, порядок виконання, вимоги до обробки результатів і оформлення звіту, а також питання для самоперевірки.

Під час виконання лабораторних робіт необхідно неухильно дотримуватися вимог електробезпеки та охорони праці: працювати лише за дозволом викладача/керівника, застосовувати справні засоби вимірювання, виконувати комутаційні операції у встановленому порядку, не допускати дотику до струмовідних частин, забезпечувати наявність і справність захисного заземлення. Усі вимірювання та перемикання мають проводитися відповідально, з фіксацією результатів у робочому журналі/таблицях та з подальшим їх аналізом.

Звіт з лабораторної роботи повинен відображати логіку виконання завдання: вихідні дані, схему або опис дослідної установки, результати вимірювань у табличній формі, необхідні розрахунки, графіки (за потреби), підсумковий висновок і відповіді на контрольні питання. Оформлення звіту розглядається як елемент професійної підготовки, оскільки якісна технічна документація є невід'ємною частиною монтажних і налагоджувальних робіт.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ КЕРУВАННЯ ДВИГУНОМ

Мета роботи. Ознайомитися з основними методами регулювання швидкості електроприводу, вивчити принципи зміни швидкості обертання електродвигунів при зміні напруги, частоти, опору та при імпульсному (ШІМ) керуванні. Навчитися аналізувати вплив кожного способу регулювання на характеристики електроприводу, оцінювати їх енергоефективність, плавність, точність та стабільність роботи.

Сформувані практичні навички вибору оптимального методу регулювання швидкості для конкретного типу механізму (насос, вентилятор, конвеєр, підймальний пристрій тощо) з урахуванням вимог до технологічного процесу, енергоспоживання та надійності роботи обладнання.

### 1.1. Основі теоретичні відомості

#### Загальні положення

Регулювання швидкості обертання електроприводу — один із ключових аспектів управління електромеханічними системами. Воно дозволяє змінювати продуктивність технологічних машин, знижувати енергоспоживання, підвищувати якість процесу та забезпечувати плавність пуску й гальмування.

Швидкість обертання електродвигуна визначається як:

$$n = \frac{60f(1 - s)}{p},$$

де  $f$  — частота живильної напруги, Гц;

$p$  — кількість пар полюсів;


$s$  — ковзання двигуна.

Зміна будь-якого з цих параметрів ( $f$ ,  $s$ ,  $p$ ) або величини прикладеної напруги  $U$  призводить до зміни швидкості двигуна. На практиці для керування використовують такі основні методи:

1. зміна напруги живлення;
2. зміна частоти живлення;
3. зміна опору у колі ротора (для двигунів з фазним ротором);
4. імпульсне (широтно-імпульсне, ШІМ) керування.

#### Регулювання швидкості зміною напруги живлення

Цей спосіб застосовується головним чином для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, коли зменшення напруги на статорі призводить до пропорційного зменшення електромагнітного моменту двигуна.



Залежність моменту від напруги описується формулою:

$$M \propto \frac{U^2}{R^2 + (sX)^2}$$

Отже, при зниженні напруги у два рази момент зменшується у чотири рази, що обмежує використання цього способу лише в механізмах з невеликим моментом навантаження (вентилятори, мішалки, приводи допоміжних механізмів).

Переваги:

- простота реалізації (через автотрансформатор, тиристорний регулятор, симісторну схему);
- низька вартість.

Недоліки:

- значні втрати потужності при зниженій напрузі;
- зменшення моменту і, як наслідок, нестабільна робота під навантаженням;
- непридатність для приводів з високими моментами.

Регулювання швидкості зміною частоти живильної напруги

Це найбільш ефективний і універсальний метод сучасного електроприводу. Частота визначає синхронну швидкість обертання:

$$n_0 = \frac{60f}{p}$$

При зміні частоти живлення змінюється швидкість обертання ротора. Щоб зберегти сталий магнітний потік у сталі двигуна, необхідно змінювати напругу пропорційно частоті (так званий закон  $U/f = const$ ).

Частотне регулювання реалізується за допомогою частотних перетворювачів (VFD). Вони формують трифазну напругу змінної частоти за рахунок широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Переваги:

- широкий діапазон плавного регулювання (1:50 і більше);
- висока енергоефективність;
- стабільність обертів при зміні навантаження;
- можливість реалізації плавного пуску, гальмування та захистів двигуна.

Недоліки:

- складність і висока вартість обладнання;
- потреба у фільтрації гармонік і правильному підборі двигуна.

Типові області застосування: насосні станції, вентилятори, компресори, конвеєри, крани, млини, металургійні приводи.

Регулювання швидкості зміною опору в колі ротора

Цей метод застосовується для асинхронних двигунів з фазним ротором. В роторне коло послідовно вмикаються додаткові реостати, опір яких регулює ковзання двигуна.

Зі збільшенням опору ковзання  $s$  зростає, тому зменшується швидкість обертання. Механічна характеристика при цьому стає більш "м'якою", що дозволяє отримати плавний пуск або короткочасне регулювання швидкості.

Переваги:

- простота реалізації;
- можливість плавного регулювання без складної електроніки;
- підвищення моменту пуску.

Недоліки:

- значні втрати енергії на нагрівання додаткового опору;
- неможливість тривалого використання через низький ККД;
- обмежений діапазон регулювання.

Застосування: механізми підйому вантажів, крани, елеватори, дробарки, де важливий великий пусковий момент.

Імпульсне (широтно-імпульсне) керування

Метод ШІМ (PWM – Pulse Width Modulation) полягає у подачі на двигун серії імпульсів напруги фіксованої частоти, але змінної тривалості.

Середнє значення напруги визначається коефіцієнтом заповнення імпульсу:

$$U_{cp} = k_z \cdot U_{max}$$

де  $k_z = \frac{t_{imp}}{T}$  – відношення тривалості імпульсу до періоду.

ШІМ використовується для керування електродвигунами постійного струму, а також у частотних перетворювачах змінного струму. Він забезпечує плавну зміну напруги без істотних втрат потужності.

Переваги:

- висока точність і швидкодія;
- економічність (мінімальні втрати);
- можливість цифрового керування через мікроконтролери або PLC.

Недоліки:

- складність схемотехніки;
- наявність високочастотних гармонік, що потребують фільтрації;
- підвищені вимоги до ізоляції двигуна.

Застосування: серводвигуни, привод подачі верстатів, конвеєри, системи автоматичного керування положенням.

Таблиця 1.1 - Порівняльна характеристика методів регулювання швидкості

Метод регулювання	Ефективність	Плавність	Складність	Тип двигуна	Сфера застосування
Зміна напруги	Низька	Обмежена	Проста	АД з КЗ ротором	Вентилятори, мішалки
Зміна частоти	Висока	Висока	Середня / складна	АД, СД	Насоси, конвеєри, компресори
Зміна опору ротора	Середня	Задовільна	Проста	АД з фазним ротором	Підймальні механізми
Імпульсне керування	Висока	Дуже висока	Складна	ДПС, інверторні системи	Прецизійні приводи, автоматика

Таблиця 1.2 - Значення для порівняння (за 5-бальною шкалою)

Метод	Енергоефективність	Плавність	Точність	Діапазон	Складність	Вартість
Зміна напруги	2	2	2	1	1	1
Зміна частоти	5	5	5	5	4	4
Опір у роторі	3	3	3	2	2	2
Імпульсне (ШІМ)	5	5	5	4	5	4

#### Висновки

- Найбільш енергоефективним і універсальним методом є частотне регулювання, яке дозволяє реалізувати плавний пуск, стабільну швидкість і економію енергії.
  - Зміна напруги доцільна лише у простих, малопотужних приводах без високих вимог до стабільності.
  - Реостатне регулювання — застарілий, але простий спосіб, придатний для підйомно-транспортних механізмів.
  - Імпульсне керування використовується переважно у сучасних цифрових системах, де потрібна висока точність і швидкість регулювання.
- Таким чином, вибір методу регулювання залежить від типу електродвигуна, технологічного процесу, вимог до точності, плавності й економічності приводу.

## 1.2 Порядок виконання роботи

Ознайомитись із принциповими схемами регулювання швидкості електроприводу.

- Провести підготовку установки: перевірити схему живлення, підключення двигуна, вимірювальних приладів та регулювальних елементів.

Послідовно провести дослідження:

- регулювання швидкості зміною напруги живлення;
- регулювання швидкості зміною частоти (на базі частотного перетворювача);
- регулювання зміною опору в колі ротора;
- імпульсне керування двигуном.

За кожного способу зафіксувати:

- напругу, струм, частоту обертання, момент навантаження;
- побудувати залежність швидкості від керуючого параметра ( $U$ ,  $f$ ,  $R$ , коеф. заповнення).

Провести порівняльний аналіз методів за критеріями:

- енергоефективність;
- стабільність швидкості;
- плавність регулювання;
- складність реалізації.

Зробити висновки щодо доцільності застосування кожного методу для різних типів механізмів (насоси, вентилятори, конвеєри, підймальні механізми).

## 1.3. Обробка результатів вимірювань

2. Для заданого типу механізму (згідно варіанту табл. 1.3. ) обрати відповідний тип електродвигуна та метод регулювання швидкості.

3. Проаналізувати можливість використання кожного із способів регулювання (зміна напруги, частоти, опору, імпульсне керування).

4. Визначити, який метод є оптимальним з точки зору:

- енергоефективності;
- плавності регулювання;
- стабільності швидкості;
- надійності та вартості реалізації.

5. Розрахувати необхідну швидкість двигуна для заданих умов і оцінити вплив зміни керуючих параметрів.

6. Зробити висновок про доцільність застосування конкретного способу в промислових умовах.

Таблиця 1.3 - Варіанти завдань

№ вар	Тип механізму	Тип двигуна	Робочий діапазон швидкості, об/хв	Навантаження (тип моменту)	Рекомендований метод регулювання	Додаткові вихідні дані
1	Вентилятор охолодження печі	Асинхронний, КЗ ротор	600–1450	Пропорційне швидкості <sup>2</sup>	Зміна частоти (V/f)	Потужність 5,5 кВт, U <sub>н</sub> =380 В, f <sub>н</sub> =50 Гц
2	Насос циркуляційний	Асинхронний, КЗ ротор	700–1450	Пропорційне швидкості <sup>3</sup>	Частотне регулювання	P=7,5 кВт, Q=50 м <sup>3</sup> /год
3	Конвеєр лінії подачі сировини	Асинхронний з фазним ротором	900–1500	Стійке (постійне)	Зміна опору в колі ротора	P <sub>2</sub> =11 кВт, R <sub>доп</sub> =0–10 Ом
4	Механізм підйому вантажів	Асинхронний з фазним ротором	600–1200	Постійне навантаження	Зміна опору ротора / частоти	M=70 Н·м, P <sub>н</sub> =15 кВт
5	Гвинтовий компресор	Асинхронний, КЗ ротор	800–1450	Постійне	Частотне регулювання	P=18,5 кВт, тиск 6 бар
6	Шнековий транспортер	Асинхронний, КЗ ротор	400–900	Пропорційне швидкості	Зміна частоти або напруги	P=3 кВт, R <sub>нагр</sub> =пост.
7	Подовжній подавач верстата	Двигун постійного струму	0–1500	Постійне	Імпульсне (ШИМ) керування	U <sub>ж</sub> =220 В, I <sub>н</sub> =15 А
8	Вентилятор аспіраційної установки	Асинхронний, КЗ ротор	500–1450	Пропорційне швидкості <sup>2</sup>	Зміна частоти	U <sub>н</sub> =380 В, f <sub>н</sub> =50 Гц
9	Мішалка технологічна	Асинхронний, КЗ ротор	300–900	Постійне	Зміна напруги	P=2,2 кВт, I <sub>н</sub> =5 А
10	Підймальний кран	Асинхронний з фазним ротором	400–900	Постійне велике навантаження	Зміна опору ротора	M <sub>кр</sub> =100 Н·м, R <sub>доп</sub> =5–10 Ом
11	Насос охолодження печі	Асинхронний, КЗ ротор	700–1450	Пропорційне швидкості <sup>3</sup>	Частотне регулювання	f=30–50 Гц, U=220–380 В
12	Стрічковий конвеєр	Асинхронний, КЗ ротор	400–1200	Постійне	Зміна частоти	P=5 кВт, M=32 Н·м
13	Змішувач шихти	Асинхронний, КЗ ротор	300–900	Постійне	Зміна напруги	f <sub>н</sub> =50 Гц, U <sub>н</sub> =380 В
14	Механізм подачі руди	Асинхронний з фазним ротором	600–1200	Постійне	Опір у роторі / частота	P <sub>н</sub> =11 кВт
15	Кульовий млин	Асинхронний, КЗ ротор	300–800	Велике навантаження	Частотне регулювання	P=30 кВт, f=20–50 Гц
16	Подавач металу	Асинхронний, КЗ ротор	400–1000	Постійне	Імпульсне керування	U <sub>вих</sub> =0–380 В (ШИМ)
17	Вентилятор димососа	Асинхронний, КЗ ротор	600–1450	Пропорційне швидкості <sup>2</sup>	Частотне регулювання	P=11 кВт, Altivar 630
18	Підймальний механізм крана	Асинхронний з фазним ротором	400–1000	Постійне	Опір у роторі	R <sub>доп</sub> =5–15 Ом
19	Механізм подачі паливного матеріалу	Асинхронний, КЗ ротор	300–900	Постійне	Зміна частоти	P=4 кВт
20	Транспортер грануляційної лінії	Асинхронний, КЗ ротор	400–1000	Пропорційне швидкості	Частотне регулювання	U <sub>н</sub> =380 В, f=25–50 Гц

Для свого варіанту студент має:

1. Визначити тип електроприводу, його основні параметри.
2. Обґрунтувати вибір оптимального способу регулювання.
3. Побудувати графічну залежність швидкості від керуючого параметра ( $U$ ,  $f$ ,  $R$ , кімп).
4. Порівняти інші методи за таблицею критеріїв ефективності.
5. Зробити висновки (до 10 речень) щодо доцільності застосування вибраного способу в промислових умовах.

#### 1.4. Критерії оцінювання

Звіту повинен містити.

1. Титульний аркуш.
2. Мету роботи.
3. Короткі теоретичні відомості.
4. Характеристика об'єкта дослідження.

Тип механізму за варіантом (насос, вентилятор, конвеєр, підйомник тощо); тип електродвигуна, номінальні параметри ( $U$ ,  $f$ ,  $P$ ,  $n$ ,  $I$ ).

5. Вихідні дані та індивідуальне завдання.

Таблиця з вихідними параметрами двигуна, умовами роботи, обраним методом регулювання.

6. Порівняльна таблиця методів регулювання.

Для кожного методу заповнити характеристики: діапазон швидкостей, енергоефективність, плавність, стабільність, складність реалізації, сфера застосування.

7. Графічна частина.

Побудовані залежності швидкості обертання від керуючих параметрів ( $n=f(U)$ ,  $n=f(f)$ ,  $n=f(R)$ ,  $n=f(k)$ ). Для практичної роботи без вимірювань — аналітична або якісна форма графіків.

8. Аналітична таблиця “Переваги – Недоліки”.

Короткий аналіз кожного способу регулювання.


9. Висновки

- порівняння результатів;
- визначення найдоцільнішого способу регулювання для конкретного механізму;
- оцінка енергетичної доцільності та стабільності роботи електроприводу.

10. Відповіді на контрольні питання.

11. Підготовлена згідно робота у форматі файлу \*.docx або \*.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт (максимум 4 балів):



4 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи ; підготовано, логічно й обґрунтовано викладено та бездоганно оформлено звіт, який за змістом, обсягом, структурою відповідає вимогам; виявив високий рівень практичних умінь під час виконання завдань; упевнено та аргументовано здійснив захист лабораторної


3 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи , який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає, вимогам; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для переважно успішного розв'язання завдань; здійснив захист лабораторних з деякими неточностями у другорядному матеріалі, які виправив самостійно.

2 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для розв'язання переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

1 бал - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено зі значними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою лише частково відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, що частково задовольняють для переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

#### 1.5. Питання для самоперевірки

1. Які основні методи регулювання швидкості електроприводу ви знаєте?
2. У чому полягає принцип регулювання швидкості зміною напруги живлення?
3. Як зміна частоти живлення впливає на швидкість обертання асинхронного двигуна?
4. Чому при зменшенні напруги знижується обертовий момент двигуна?
5. У яких випадках доцільно використовувати регулювання швидкості зміною опору в колі ротора?
6. Які недоліки має реостатне регулювання швидкості двигуна з фазним ротором?
7. Поясніть суть частотного ( $V/f$ ) керування електроприводом.



8. Що таке широтно-імпульсне (ШІМ) керування і де воно застосовується?

9. Як співвідносяться частота, момент і струм двигуна при частотному регулюванні?

10. Які переваги має використання частотного перетворювача Altivar у системах керування швидкістю?

11. Як змінюється енергоспоживання двигуна при різних способах регулювання швидкості?

12. Який метод забезпечує найвищу плавність і точність регулювання швидкості?

13. У чому полягає принцип енергоефективності при частотному регулюванні вентиляторів і насосів?

14. Як вибрати оптимальний метод регулювання для конкретного типу механізму?

15. Які фактори впливають на вибір способу регулювання швидкості (технічні, економічні, експлуатаційні)?

#### 1.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Експлуатація та монтаж електрообладнання : методичні вказівки для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація та монтаж електрообладнання» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Р. В. Телюта, О.А.Козловський, В. В. Зінзура. Кропивницький : ЦНТУ, 2018. 200 с.

2. Монтаж енергообладнання та систем керування : навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / М. П. Кунденко та ін. Ч. І. Харків : ХНТУСГ, 2017. 282 с.

3. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навчальний посібник / Грабко В. В., Бабій С. М., Мошноріз М. М. та ін. Вінниця : ВНТУ, 2011. 137 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2 ВИМІРЮВАННЯ ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ

Мета роботи. Набути практичних навичок перевірки технічного стану кабельних ліній 0,4–10 кВ, виконання вимірювань опору ізоляції, визначення місця пошкодження різними методами (мостовим, імпульсним, індукційним, акустичним), оцінки придатності кабелю до подальшої експлуатації та формування практичних умінь з ремонту і відновлення його працездатності.

### 2.1. Основі теоретичні відомості

Кабельні лінії електропередачі 0,4–10 кВ є основними елементами систем електропостачання промислових підприємств. Вони забезпечують безперервну передачу електроенергії між розподільчими пристроями, трансформаторними підстанціями та споживачами.

Під час експлуатації кабельні лінії піддаються впливу температури, вологи, механічних навантажень, електричних перенапруг та хімічних факторів, що може призводити до старіння ізоляції, пробоїв і механічних пошкоджень.

Випробування та перевірка кабельних ліній

Перед введенням у експлуатацію, після ремонту, а також періодично у процесі роботи кабельні лінії підлягають випробуванню відповідно до вимог ПУЕ, ДСТУ EN 60229, ДСТУ EN 50110-1.

До основних видів перевірок належать:

- Зовнішній огляд: перевірка цілісності оболонок, з'єднань, відсутності механічних пошкоджень.
- Вимірювання опору ізоляції мегомметром (напр. типу M4100, M1102, MIC-10, Metriso 5000).
- Перевірка цілісності жил методом омметра або мостовим методом.
- Випробування підвищеною напругою для визначення електричної міцності ізоляції.
- Визначення місць пошкодження — із застосуванням акустичних, імпульсних, індукційних або мостових методів (наприклад, апарати типу P5-10, E6-24, MC-08).

Вимірювання опору ізоляції

Опір ізоляції кабелю  $R_i$  визначається як відношення прикладеної напруги  $UUU$  до виміряного струму витoku  $III$ :

$$R_i = \frac{U}{I}$$

Нормовані значення:

- для кабелів 0,4 кВ — не менше 0,5 МОм на 1 кВ робочої напруги;
- для кабелів 6–10 кВ — не менше 10 МОм.

Визначення місця пошкодження

Основні методи:

1. Метод відбитого імпульсу (TDR) — визначення за часом проходження хвилі до місця дефекту.
2. Мостовий метод — використовується для вимірювання опору до місця пошкодження при пробі однієї жили.
3. Акустичний метод — фіксація звуку електричного розряду під час пробою ізоляції.
4. Індукційний метод — визначення положення кабелю та зони пошкодження за зміною індукованої напруги.

Ремонт та відновлення працездатності

Після виявлення пошкодження виконуються роботи з відновлення ізоляції або заміни пошкодженої ділянки кабелю. З'єднання жил здійснюється за допомогою:

- мідних або алюмінієвих гільз з опресуванням або паянням;
- термоусаджувальних муфт (прямі, кінцеві, відгалужувальні);
- полімерних герметиків для забезпечення вологоізоляції.

Після ремонту кабельна лінія повторно проходить повний цикл випробувань.

## 2.2 Програма роботи

1. Ознайомитись з вимогами техніки безпеки при роботі з вимірювальними установками до 10 кВ.
2. Виконати зовнішній огляд макета або кабельного зразка.
3. Виміряти опір ізоляції між жилами і між жилами та оболонкою.
4. Змодельювати пошкодження (штучний пробій або коротке замикання) та визначити місце дефекту одним із методів.
5. Виконати відновлення ізоляції або заміну ділянки кабелю.
6. Повторно виміряти опір ізоляції після ремонту.
7. Порівняти результати з нормативними значеннями та зробити висновок щодо придатності кабелю до експлуатації.

## 2.3. Завдання та вихідні дані.

Інструкція для виконання розрахунків:

Визначити опір ізоляції, нормований до 1 км:

$$R_{i,1\text{км}} = R_{\text{вим}} \cdot \frac{L}{1000} R_i,$$

Розрахувати відстань до пошкодження методом Мюррея:

$$x = L \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Розрахувати відстань за імпульсним методом:

$$x = \frac{k \cdot c \cdot t}{2}$$

де  $k$  — із таблиці (для свого типу кабелю),  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Порівняти результати двох методів: Відхилення не повинно перевищувати 10 %.

Оцінити придатність кабелю: якщо  $R_{i,1\text{км}} \geq R_{i,\text{min}}$  (ив. таблицю нормативів) → лінія придатна.

Зробити висновок:

- точка дефекту — на відстані xxx м від точки вимірювання;
- кабель підлягає ремонту / придатний до експлуатації;
- описати рекомендовані дії.

Вимірювання опору ізоляції

Формула:

$$R_i = \frac{U_{\text{мег}}}{I_{\text{вит}}}$$

Приклад: якщо мегомметр 1000 В показує струм витоку  $I=10 \mu\text{A}$ :

$$R_i = \frac{1000}{10 \cdot 10^{-6}} = 100$$

Нормування до 1 км  
для довжини  $L=0,2\text{км}$ :

$$R_{i,1\text{км}} = R_i \cdot \frac{L}{1} = 100 \cdot 0,2 = 20 \text{ МОМ}$$

Якщо норматив  $\geq 10 \text{ МО}$  — ізоляція придатна.

Температурна поправка

$$R_i(T_2) = R_i(T_1) \cdot 2^{\frac{T_1 - T_2}{10}}$$

Приклад:

при  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $R_i(20) = 20\text{МОм}$ ,  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ :

$$R_i(40) = 20 \cdot 2^{-2} = 5\text{МОм}$$

Ізоляція при нагріві зменшує опір.

Опір жили

$$R = \rho \frac{L}{A}$$

де  $\rho_{Al} = 0,0282 \Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ .

Приклад:

для Al  $120 \text{ мм}^2$ ,  $L = 200 \text{ м}$ :

$$R = 0,0282 \frac{200}{120} = 0,047 \text{ Ом}$$

Визначення місця пошкодження — імпульсний метод (TDR)

$$x = \frac{v \cdot t}{2} = \frac{k \cdot c \cdot t}{2}$$

де  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ ,  $k \approx 0,6$

Приклад:

$t = 1,3 \mu\text{s}$ :

$$x = \frac{0,6 \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 1,3 \cdot 10^{-6}}{2} = 117 \text{ м.}$$

Міст Мюррея

$$x = L \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Приклад:

$L = 200 \text{ м}$ ,  $R_1 = 120 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ :

$$x = 200 \cdot \frac{120}{220} = 109 \text{ м}$$

Місце дефекту —  $\approx 109 \text{ м}$  від випробувальної точки.

Міст Варлея (з опором у місці пошкодження)

$$x = L \cdot \frac{R_b}{R_{\text{loop}} - R_b}$$

де  $R_{\text{loop}}$  — повний опір петлі,  $R_b$  — балансне значення магазину.

Приклад:

$$L = 200\text{м}, R_{\text{loop}} = 10\text{м}, R_b = 0,250\text{м}:$$

$$x = 200 \cdot \frac{0,25}{1 - 0,25} = 66,7\text{м}$$

Ємнісний метод (для обривів)

$$x = L \cdot \frac{C_x}{C_{\text{повн}}}$$

Приклад

$$L = 150\text{м}, C_x = 0,42\mu\text{F}, C_{\text{повн}} = 0,60\mu\text{F}:$$

$$x = 150 \cdot \frac{0,42}{0,60} = 105\text{м}.$$

Випробування підвищеною напругою

$$U_{\text{випр}} = k \cdot U_0$$

де  $k = 2 - 3$ ,  $U_0$  — робоча фазна.

Приклад:

$$U_0 = 6\text{кВ}, k = 2,5;$$

$$U_{\text{випр}} = 15\text{кВ}$$

Струм витоку:

$$I_{\text{вит}} = \frac{U_{\text{випр}}}{R_i} = \frac{15000}{10^7} = 1,5\text{mA}.$$

Якщо струм стабільний і без пробоїв — випробування успішне.

Акустичний та індукційний методи

Формул немає — визначення за максимумом сигналу.

Параметри: швидкість розповсюдження хвилі звуку в ґрунті  $v_a \approx 1500\text{м/с}$ .

Якщо відомий час між імпульсом та акустичним відлунням  $t_a$ :

$$x = \frac{v_a \cdot t_a}{2}$$

Енергія розрядника (thumper)

$$W = \frac{1}{2} C_{\text{зар}} U_{\text{зар}}^2$$

Приклад:

$$C_{\text{зар}} = 50 \mu\text{F}, U_{\text{зар}} = 4 \text{кВ:}$$

$$W = 0,5 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot (4000)^2 = 400 \text{Дж}$$

Таблиця 2.1 - Коротка таблиця довідкових параметрів

Матеріал	$\rho, \Omega \cdot \text{мм}^2/\text{м}$	$v$ (TDR), м/ $\mu\text{s}$	k	Мін. Ri (на 1 кВ)
Мідь	0,0175	180	0,6	0,5 МОм
Алюміній	0,0282	160	0,53	0,5 МОм
Поліетиленова ізоляція	—	—	—	$\geq 10$ МОм при 6–10 кВ

Рекомендована структура розрахункової частини звіту

Короткі вихідні дані (тип кабелю, довжина, напруга, температура, метод).

Виміряні значення  $U_{\text{мег}}, I_{\text{вит}}, t, R_1, R_2, C_x$  тощо.

Підстановка у відповідні формули:

$-R_i, R_{i,1\text{км}}, x_{\text{TDR}}, x_{\text{Мюррей}}, x_{\text{есн}}$ .

Порівняння методів і висновок.

Короткий запис ремонтних дій та повторної перевірки.

Таблиця 2.2 - Типові коефіцієнти швидкості (Velocity Factor, k) та швидкість поширення сигналу

№	Тип кабелю / ізоляції	Коефіцієнт швидкості (k)	Швидкість поширення ( $v = k \cdot c$ ), м/мкс	Хвильовий опір ( $Z_0$ ), Ом (орієнтовно)	Коментар
1	Кабелі з ПВХ ізоляцією (ВВГ, АВВГ)	0,45–0,55	135–165	50–80	Залежить від товщини ізоляції та вологи
2	Кабелі з ПЕ ізоляцією (АВБбШв, ВВГнг-LS)	0,50–0,65	150–195	50–75	Найпоширеніші промислові кабелі 0,4–6 кВ
3	Кабелі з зшитим поліетиленом (XLPE, ПвБбШв, ПвПуГ)	0,60–0,70	180–210	60–80	Високовольтні лінії 6–10 кВ
4	Кабелі з паперовою ізоляцією (ААШв, ААШп)	0,40–0,50	120–150	40–60	Швидкість зменшується при зволоженні
5	Кабелі контрольні (КВВГ, КВБбШв)	0,45–0,60	135–180	70–100	Менші перерізи, вище хвильовий опір
6	Кабелі силові з екраном або бронею	0,55–0,65	165–195	50–65	Для точних вимірів треба знати конструкцію екрана
7	Кабелі зв'язку, телеком (коаксіальні)	0,65–0,88	195–265	50	Для калібрування приладу TDR
8	Повітряні лінії (трос, паралельні жили)	0,95	285	300	Еталон швидкості для відкритої траси

Таблиця 2.3 - Коефіцієнти перерахунку та поправки для TDR і МОСТОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Параметр	Позначення	Типові значення / формули	Призначення
Швидкість поширення	$(v = k \cdot c)$	$(c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с})$	Для обчислення відстані до дефекту
Поправка на температуру	$(v_T = v_{20}(1 + 0,0025 \cdot (T - 20)))$	При підвищенні температури швидкість ↑	Уточнення при польових вимірюваннях
Похибка через неточність (k)	$(\Delta x/x = \Delta k/k)$	Напр. при похибці $(\pm 0,05) \rightarrow \pm 8\%$	Враховується при визначенні довжини
Похибка через час дискретизації	$(\Delta x = \frac{v \cdot \Delta t}{2})$	$(\Delta t)$ — мінімальний крок TDR	Для оцінки роздільної здатності
Емпіричний коеф. для паперової ізоляції	$(k_{\text{пап}} \approx 0,48)$	Менше через високу діелектричну проникність	
Емпіричний коеф. для поліетиленової ізоляції	$(k_{\text{ПЕ}} \approx 0,64)$	Стандарт для XLPE і ПЕ кабелів	
Діелектрична проникність (ПЕ, XLPE)	$(\epsilon_r = (1/k)^2)$	$(\epsilon_r \approx 2,4 - 3,0)$	Використовується для розрахунку $(Z_0)$
Хвильовий опір	$(Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{D}{d})$	$(D/d)$ співвідношення діаметрів	Для розрахунку відбиття

Таблиця 2.4 - Мінімумально допустимий опір ізоляції згідно з ПУЕ / ДСТУ

Номинальна напруга лінії, кВ	Мін. опір ізоляції $(R_{i,min} \text{ МОм})$	Перевірочна напруга мегометра, кВ
До 1 кВ	$\geq 0,5 \text{ МОм на } 1 \text{ кВ}$	1
1–3 кВ	$\geq 5 \text{ МОм}$	2,5
6–10 кВ	$\geq 10 \text{ МОм}$	2,5–5
20–35 кВ	$\geq 50 \text{ МОм}$	5–10

Таблиця 2.5 - Орієнтовні питомі параметри силових кабелів

Тип кабелю	Питомий опір жили, Ом/км	Питомий ємнісний параметр $(c_0)$ , нФ/км	Питомий індуктивний параметр $(l_0)$ , мГн/км
ВВГ 3×70	0,443	270	0,40
АВВГ 3×70	0,735	250	0,42
ААШв 3×120	0,235	300	0,38
АВБбШв 3×95	0,295	290	0,39
ПвБбШв 3×150 (XLPE)	0,206	260	0,36
ВВГнг 4×35	0,524	240	0,42

Як користуватись таблицями під час розрахунку:

Визнач тип кабелю за маркою або матеріалом ізоляції.

Візьміть коефіцієнт k із Таблиці 2.2 розрахуйте швидкість  $v = k \cdot 3 \cdot 10^8$ .

За виміряним часом відбиття t знайдіть відстань  $x = \frac{v \cdot t}{2}$ .

Для уточнення — використайте поправку на температуру або вологість.

При міжфазному пошкодженні — застосуйте міст Мюррея з тими ж параметрами  $L$  і  $r$ , що відповідають табличним питомим опорам.

Таблиця 2.6 - Варіанти завдання

№	Тип кабелю	Un, кВ	L, м	T, °C	R <sub>1</sub> , Ω	R <sub>2</sub> , Ω	t, μs	Rвим, МОм	Завдання
1	АВВГ 3×70	0,4	120	20	110	100	1,25	15	Розрахувати $x$ (Мюррей), $R_i$ (норм. до 1 км), оцінити ізоляцію
2	ВВГ 3×95	0,4	80	25	90	80	0,95	10	Розрахувати $x$ (Мюррей), порівняти з TDR
3	ААШв 3×120	6	200	20	120	100	1,35	25	Розрахувати $x$ за Мюрреєм і TDR, оцінити придатність
4	АВБбШв 3×50	10	150	18	100	85	1,05	8	Визначити місце пошкодження, порівняти два методи
5	ВВГнг 4×35	0,4	100	22	105	95	0,80	12	Розрахувати $x$ (Мюррей), зробити висновок
6	ААШв 3×240	6	300	20	130	120	2,00	30	Визначити відстань до дефекту, оцінити $R_i$
7	ААШв 3×150	10	250	15	140	100	1,60	20	Розрахувати $x$ (Мюррей), порівняти з $x$ (TDR)
8	АВБбШв 3×70	10	180	25	95	105	1,20	7	Розрахувати $x$ (Мюррей), зробити висновок
9	ВВГ 3×25	0,4	60	20	80	70	0,65	6	Розрахувати $x$ (Мюррей), оцінити опір ізоляції
10	АВВГ 4×50	0,4	130	20	100	90	1,10	9	Розрахувати $x$ , порівняти з нормативом $R_i$
11	ААШп 3×70	6	210	18	115	95	1,45	12	Розрахувати $x$ (Мюррей) і TDR
12	АПвПуГ 3×120 (XLPE)	10	280	20	125	110	1,80	20	Розрахувати $x$ двома методами, зробити висновок
13	ВВГнг-LS 3×16	0,4	75	22	75	65	0,70	4	Розрахувати $x$ (Мюррей), оцінити стан ізоляції
14	АВБбШв 3×95	6	190	20	110	100	1,25	18	Розрахувати $x$ , перевірити по TDR
15	ААШв 3×95	10	230	25	125	115	1,60	9	Розрахувати $x$ і $R_i$ , оцінити допустимість
16	АПвБбШв 3×150	6	250	20	130	100	1,75	22	Розрахувати $x$ (Мюррей), порівняти з TDR
17	АВВГ 4×25	0,4	110	15	80	70	0,85	8	Розрахувати $x$ , $R_i$ (1км)
18	ВВГ 3×10	0,4	50	20	60	50	0,50	5	Розрахувати $x$ (Мюррей), оцінити ізоляцію
19	ААШв 3×95	10	230	18	120	100	1,50	14	Розрахувати $x$ (Мюррей і TDR)
20	АВБбШв 3×120	6	260	22	130	120	1,85	25	Розрахувати $x$ , $R_i$ , зробити висновок

Додаткові умови для виконання варіантів:

1. Розрахувати очікуваний опір ізоляції при робочій температурі 20 °С.
2. Змодельювати типову ділянку кабелю (з урахуванням довжини та типу пошкодження).
3. Побудувати схему підключення вимірювальної установки.
4. Виконати розрахунок відстані до місця пошкодження за обраним методом.
5. Визначити придатність кабельної лінії до експлуатації після ремонту.

## 2.4. Критерії оцінювання

Зміст звіту

1. Мета роботи — перевірити стан кабельної лінії, визначити опір ізоляції та місце пошкодження.
2. Індивідуальне завдання — тип кабелю, довжина, результати вимірювань ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $t$ ,  $R_{\text{вим}}$ ).
3. Хід роботи — виконання вимірювань, розрахунок  $R_{i,1\text{км}}$ ,  $x_{\text{Мюррей}}$ ,  $x_{TDR}$ .
4. Результати — таблиця з розрахунками, схема вимірювання.
5. Висновок — стан ізоляції, відстань до дефекту, придатність кабелю до експлуатації.


Підготовлена згідно робота у форматі файлу \*.docx або \*.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт (максимум 4 балів):

4 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи ; підготовано, логічно й обґрунтовано викладено та бездоганно оформлено звіт, який за змістом, обсягом, структурою відповідає вимогам; виявив високий рівень практичних умінь під час виконання завдань; упевнено та аргументовано здійснив захист лабораторної

3 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи , який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає, вимогам; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для переважно успішного розв'язання завдань; здійснив захист лабораторних з деякими неточностями у другорядному матеріалі, які виправив самостійно.

2 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає вимогам, але визначається



неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для розв'язання переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

1 бал - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено зі значними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою лише частково відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, що частково задовольняють для переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

## 2.5. Питання для самоперевірки

1. Які основні причини пошкодження кабельних ліній у процесі експлуатації?

2. Для чого проводиться вимірювання опору ізоляції кабелів?

3. Які прилади використовуються для вимірювання опору ізоляції?

4. Які нормативні значення опору ізоляції для кабелів напругою 0,4–10 кВ?

5. Від яких факторів залежить величина опору ізоляції?

6. У чому полягає принцип дії мосту Мюррея?

7. Як визначається відстань до місця пошкодження кабелю методом Мюррея?

8. У яких випадках застосовується метод Варлея?

9. Що характеризує коефіцієнт швидкості  $k$  у методі TDR?

10. Як визначається відстань до місця пошкодження за імпульсним методом (TDR)?

11. Які типи пошкоджень можна виявити імпульсним методом?

12. Які особливості має акустичний метод пошуку пошкоджень?

13. Як проводиться перевірка кабелю підвищеною напругою після ремонту?


14. Які заходи безпеки необхідно дотримуватись при випробуванні кабельних ліній?

15. Які дії виконує персонал після виявлення і усунення дефекту кабелю?

## 2.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навч. посіб. / В. В. Грабко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2020. 173 с.

2. Експлуатація та монтаж електрообладнання : методичні вказівки для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація та монтаж електрообладнання» за спеціальністю 141 «Електроенергетика,



електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Р. В. Телюта, О.А.Козловський, В. В. Зінзура. Кропивницький : ЦНТУ, 2018 200 с.

3. Монтаж і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форми навчання / уклад. Ю.В. Грицюк. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 48 с.

4. Циганов О. М., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій. Миколаїв, 2022, 160 с.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 ВИПРОБУВАННЯ ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РЕЖИМІ ХОЛОСТОГО ХОДУ

Мета роботи - ознайомлення з методикою випробування електродвигуна в режимі холостого ходу та набуття навичок визначення основних енергетичних показників цього режиму. У процесі виконання роботи необхідно за заданими вихідними даними визначити струм холостого ходу  $I_0$ , активну потужність  $P_0$ , розрахувати повну потужність  $S_0$ , коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_0$  і реактивну потужність  $Q_0$ , а також виконати оцінку складових втрат (за наявності додаткових даних) і зробити висновок щодо коректності та характеру роботи двигуна в режимі ХХ.

### 3.1 Основні теоретичні відомості

#### Призначення та сутність випробування

Випробування електродвигуна в режимі холостого ходу (ХХ) — це стандартний етап первинної оцінки технічного стану електричної машини після монтажу, ремонту або перед введенням в експлуатацію. У режимі ХХ двигун працює при номінальній напрузі за відсутності механічного навантаження на валу, а споживана активна потужність витрачається переважно на покриття внутрішніх втрат у машині.

Метою випробування є визначення та аналіз:

- струму холостого ходу ( $I_0$ );
- активної потужності холостого ходу ( $P_0$ );
- коефіцієнта потужності в режимі ХХ ( $\cos\varphi_0$ );
- складових втрат (статорні мідні, у сталі, механічні);
- непрямих ознак справності: відсутність сторонніх шумів/вібрації, перегріву, несиметрії струмів тощо.

#### Режим холостого ходу та баланс потужностей

Для трифазного асинхронного двигуна при ХХ механічна потужність на валу практично дорівнює нулю:

$$P_2 \approx 0$$

а активна потужність, що споживається з мережі, дорівнює сумі втрат:

$$P_0 = P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{mec} + P_{add}$$

де ( $P_{Cu1}$ ) — втрати в міді обмотки статора;

( $P_{Fe}$ ) — втрати в сталі (гістерезисні та від вихрових струмів);

( $P_{mec}$ ) — механічні втрати (тертя в підшипниках, вентиляція);

( $P_{add}$ ) — додаткові (розсіювання, нерівномірність поля тощо).

Особливості:

- при ХХ ковзання мале ( $s \rightarrow 0$ ), тому втрати в роторі ( $P_{Cu2}$ ) незначні;
- ( $P_{Fe}$ ) і ( $P_{mec}$ ) є основними складовими ( $P_0$ ) для двигунів середньої та більшої потужності;
- ( $P_{Cu1}$ ) зростає зі збільшенням ( $I_0$ ) та враховується як ( $3I_0^2 R_1$ ) (за наявності ( $R_1$ )).

**Вимірювані параметри та розрахункові співвідношення**

**Лінійна напруга (трифазна мережа):** ( $U_L$ ) (наприклад 380/400 В).

**Лінійний струм ХХ:** ( $I_0$ ) (вимірюється по фазах/лініях).

**Активна потужність ХХ:** ( $P_0$ ) (за ватметром(ами) або розрахунково за заданими даними).

Для трифазної симетричної системи:

$$S_0 = \sqrt{3}, U_L I_0$$
$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}, U_L I_0}$$
$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2}$$

**Зверніть увагу:** ( $\cos\varphi_0$ ) — це коефіцієнт потужності саме у режимі холостого ходу. У цьому режимі він, як правило, малий (двигун споживає значну реактивну складову на магнітний потік), тому ототожнювати його з номінальним ( $\cos\varphi_n$ ) некоректно.

**Типові діагностичні ознаки за результатами ХХ**

Результати ХХ дозволяють виконати якісну діагностику:

- **Підвищений ( $I_0$ )** (за незмінного ( $U_L$ )): можливе міжвиткове замикання у статорі, зниження індуктивності намагнічування, помилки з'єднання обмоток (Y/ $\Delta$ ), насичення магнітопроводу.
- **Підвищений ( $P_0$ ):** можливе збільшення механічних втрат (підшипники, тертя, перекіс), погіршення стану вентилятора, збільшені втрати в сталі (дефекти магнітопроводу).
- **Несиметрія струмів ХХ:** дефекти обмотки, несиметрія напруги живлення, погані контактні з'єднання.
- **Перегрів, шум, вібрація** при ХХ: механічні дефекти (підшипники, розбалансування), ослаблення кріплень, перекіс під час монтажу.

**Умови коректності випробування**

Для забезпечення порівнюваності й достовірності результатів ХХ необхідно:

- подавати на двигун **номінальну напругу** (або фіксувати фактичну ( $U_L$ ));
- забезпечити **відсутність механічного навантаження** (роз'єднання з механізмом або режим без навантаження);

- враховувати, що  $(P_0)$  та  $(I_0)$  залежать від **температури, частоти та напруги** живлення;
- виконувати аналіз із урахуванням паспортних даних двигуна.

### 3.2 Порядок виконання роботи

#### Підготовчий етап

1. **Ознайомитися з паспортними даними двигуна** (або заданими в умові):

- тип/серія,  $(P_n)$ ,  $(U_n)$ ,  $(I_n)$ ,  $(f_n)$ ,  $(n_n)$ , схема з'єднання обмоток ( $Y/\Delta$ ),  $(\cos \varphi_n)$ ,  $(\eta_n)$  (за наявності).

2. **Прийняти умови випробування ХХ:**

- двигун розвантажений:  $(P_2 \approx 0)$ ;
- подається номінальна напруга  $(U_L \approx U_n)$  і номінальна частота ( $f = 50$ , Гц) (або задані фактичні значення);
- мережа вважається симетричною (якщо не задано інакше).

3. **Визначити склад вимірювань**, які потрібні для розрахунків:

- лінійна напруга  $(U_L)$ ;
- лінійний струм холостого ходу  $(I_0)$  (за потреби — по фазах/лініях);
- активна потужність холостого ходу  $(P_0)$  (сумарна трифазна).

#### Схема вимірювання та прийнятий метод

##### Варіант А (узагальнений трифазний вимір):

- $(U_L)$  — вимірюється вольтметром між лініями;
- $(I_0)$  — амперметром у лінії (або як середнє з трьох лінійних струмів);
- $(P_0)$  — як сумарна активна потужність (за наданим значенням).

##### Варіант Б (метод двох ватметрів, якщо задано $(W_1)$ і $(W_2)$ ):

- $(P_0 = W_1 + W_2)$ ;
- за потреби додатково визначають  $(\cos \varphi_0)$  через  $(P_0, U_L, I_0)$ .

У звіті достатньо: **вказати, який варіант прийнято**, і які саме значення задані як «результати вимірювань».

#### Отримання (задання) вихідних даних для режиму ХХ

1. Записати у таблицю вихідних даних **номінальні параметри** двигуна (паспортні або задані).

2. Записати **дані режиму ХХ**, які в роботі вважаються «виміряними» (за варіантом завдання):

- $(U_L)$ , В;
- $(I_0)$ , А (за потреби:  $(I_{0A}, I_{0B}, I_{0C})$ );
- $(P_0)$ , Вт (або  $(W_1), (W_2)$  для методу двох ватметрів).

3. Якщо в умові наведені **кілька точок** (наприклад, при різних ( $U_L$ )), то дані заносять для кожної точки окремим рядком — це дозволяє проаналізувати залежності.

#### **Підготовка даних до обробки**

1. Перевірити коректність одиниць вимірювання (В, А, Вт).
2. Перевірити фізичну узгодженість:
  - ( $I_0$ ) не може бути нульовим;
  - ( $P_0$ ) має бути додатним;
  - за заданими ( $U_L$ ) та ( $I_0$ ) повна потужність ( $S_0 = \sqrt{3}U_L I_0$ ) повинна бути **не меншою** за ( $P_0$ ) (тобто ( $P_0 \leq S_0$ )).
3. За наявності фазних/лінійних значень:
  - якщо задано ( $U_\varphi$ ) — перерахувати до ( $U_L$ ) відповідно до схеми Y/Δ (або навпаки), та зафіксувати перерахунок у примітці.
4. Підготувати дані для подальших розрахунків:
  - залишити місце (графи) для ( $S_0$ ), ( $\cos\varphi_0$ ), ( $Q_0$ );
  - за необхідності — для оцінки втрат ( $P_{Cu1}$ ), ( $P_{Fe} + P_{mec}$ ) (якщо в завданні буде ( $R_1$ ) або інші додаткові дані).
5. Підготувати звіт

### 3.3 Обробка результатів вимірювання

#### **Вихідні дані для розрахунків**

До обробки приймають (задані у варіанті або з «умовних вимірювань»):

- лінійну напругу  $U_L$ , В;
- лінійний струм холостого ходу  $I_0$ , А (за потреби:  $I_{0A}$ ,  $I_{0B}$ ,  $I_{0C}$ );
- сумарну активну потужність холостого ходу  $P_0$ , Вт
- (або покази двох ватметрів  $W_1$ ,  $W_2$ , тоді  $P_0 = W_1 + W_2$ );
- (за наявності у варіанті) активний опір обмотки статора однієї фази  $R_1$ , Ом — для оцінки мідних втрат статора.

Якщо у варіанті наведено декілька режимних точок (різні  $U_L$ ), розрахунки виконують для кожної точки окремо.

#### **Розрахунок повної, активної та реактивної потужностей у режимі ХХ**

1. **Повна потужність холостого ходу**

$$S_0 = \sqrt{3} U_L I_0$$

де  $U_L$  — лінійна напруга,  $I_0$  — лінійний струм ХХ.

## 2. Коефіцієнт потужності у режимі ХХ

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_L I_0} = \frac{P_0}{S_0}$$

## 3. Реактивна потужність у режимі ХХ

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2}$$

**Контроль правильності:** має виконуватись  $0 < \cos\varphi_0 \leq 1$  та  $P_0 \leq S_0$ .

**Оцінка складових втрат (за наявності додаткових даних)**

**Мідні втрати у статорі при ХХ**

Якщо задано  $R_1$  (опір однієї фази статора), тоді:

$$P_{Cu1} = 3I_{\varphi 0}^2 R_1$$

Для практичних розрахунків у лабораторній (за симетрії) допускають:

- якщо  $I_0$  заданий як **лінійний струм**, а двигун підключено за схемою **Y**:

$$I_{\varphi 0} = I_0$$

- якщо підключення за схемою **Δ**:

$$I_{\varphi 0} = \frac{I_0}{\sqrt{3}}$$

У теоретичному варіанті, якщо схема з'єднання не задана, приймають **Y** (з обов'язковою приміткою у звіті).

**Сумарні втрати в сталі та механічні (укрупнено)**

Після визначення  $P_{Cu1}$  оцінюють:

$$P_{Fe} + P_{mec} + P_{add} \approx P_0 - P_{Cu1}$$

Якщо  $R_1$  не задано — у звіті зазначають, що **розподіл втрат не виконується**, а аналіз проводиться за  $P_0$ ,  $I_0$ ,  $\cos\varphi_0$ .

**Оцінка симетрії струмів (якщо задані струми по фазах/лініях)**

Якщо задано  $I_{0A}$ ,  $I_{0B}$ ,  $I_{0C}$ , визначають середнє:

$$I_{0avg} = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}$$

та відносне відхилення (максимальне):

$$\delta_I = \frac{\max(|I_{0A} - I_{0avg}|, |I_{0B} - I_{0avg}|, |I_{0C} - I_{0avg}|)}{I_{0avg}} \cdot 100$$

У висновку зробити якісну оцінку: симетричний/несиметричний режим за отриманим  $\delta_I$ .

### Варіанти завдань (ЛР №3 «Випробування електродвигуна в режимі холостого ходу», теоретично)

Для кожного варіанта студент має:

1. обчислити  $S_0$ ,  $\cos\varphi_0$ ,  $Q_0$ ;
2. за наявності  $R_1$  — оцінити  $P_{Cu1}$  та  $P_0 - P_{Cu1}$ ;
3. якщо задано  $I_{0A}, I_{0B}, I_{0C}$  — визначити  $\delta_I$  (несиметрію струмів).

Прийнято: мережа 50 Гц; режим ХХ — без механічного навантаження.

Таблиця 3.1 — Вихідні дані

Варіант	$P_n$ , кВт	$U_L$ , В	Схема	$I_0$ , А (або $I_{0A}/I_{0B}/I_{0C}$ , А)	$P_0$ , Вт	$R_1$ (1 фаза), Ом
1	1.5	400	Y	$I_0 = 2.6$	220	3.20
2	2.2	400	Y	$I_{0A}/I_{0B}/I_{0C} = 3.4/3.3/3.5$	320	2.10
3	4.0	380	$\Delta$	$I_0 = 6.8$	780	0.85
4	5.5	400	Y	$I_{0A}/I_{0B}/I_{0C} = 7.6/7.4/7.8$	920	0.62
5	7.5	400	$\Delta$	$I_0 = 9.5$	1250	0.48
6	11	380	Y	$I_0 = 10.2$	1450	0.36
7	15	400	Y	$I_{0A}/I_{0B}/I_{0C} = 11.8/11.5/12.1$	1650	0.28
8	18.5	400	$\Delta$	$I_0 = 14.0$	2150	0.22
9	22	380	Y	$I_{0A}/I_{0B}/I_{0C} = 15.2/14.8/15.6$	2450	0.18
10	30	400	Y	$I_0 = 18.5$	3200	0.14

### Рекомендована форма таблиці для обробки (для звіту)

Таблиця 3.2 — Вихідні дані та результати розрахунків режиму холостого ходу

Варіант	$P_n$ , кВт	$U_L$ , В	Схема (Y/ $\Delta$ )	$I_{0A}$ , А	$I_{0B}$ , А	$I_{0C}$ , А	$I_0$ (середн.), А	$P_0$ , Вт	$R_1$ , Ом	$S_0$ , ВА	$\cos\varphi_0$	$Q_0$ , вар	$P_{Cu1}$ , Вт	$P_0 - P_{Cu1}$ , Вт	$\delta_I$ , %
1															
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															

Заповнити для свого.

Якщо  $R_1$  не задано — графі  $P_{Cu1}$  та  $P_0 - P_{Cu1}$  не заповнювати.

Якщо задано  $I_{0A}, I_{0B}, I_{0C}$  — додатково заповнити  $\delta_I$ .

Розрахункові формули

Якщо задано один струм:  $I_0 = I_0$ . Якщо задано три струми:

$$I_0 = \frac{I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}}{3}$$

Повна потужність:

$$S_0 = \sqrt{3} U_L I_0$$

Коефіцієнт потужності:

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{S_0}$$

Реактивна потужність:

$$Q_0 = \sqrt{S_0^2 - P_0^2}$$

Мідні втрати статора (за наявності  $R_1$ ):

$$P_{Cu1} = 3I_{\varphi 0}^2 R_1, I_{\varphi 0} = \begin{cases} I_0, & \text{Y} \\ \frac{I_0}{\sqrt{3}}, & \Delta \end{cases}$$

Несиметрія струмів:

$$\delta_I = \frac{\max(|I_{0A} - I_0|, |I_{0B} - I_0|, |I_{0C} - I_0|)}{I_0} \cdot 100$$

**Підсумковий аналіз і формулювання висновків**

У висновках до розділу обробки (2–4 речення) зазначають:

- отримані  $I_0, P_0, \cos\varphi_0, Q_0$  (для 1 точки — конкретними числами; для кількох — діапазоном);
- оцінку характеру режиму ХХ (типово: значна реактивна складова, малий  $\cos\varphi_0$ );
- за наявності  $R_1$ : частку мідних втрат статора та орієнтовну величину  $P_{Fe} + P_{mec}$ ;
- за наявності фазних струмів: висновок щодо симетрії.

## Вимоги до оформлення результатів

У звіті мають бути:

- таблиця з **паспортними даними** двигуна;
- таблиця з **даними режиму ХХ** (заданими як виміряні);
- короткий запис прийнятої **схеми/методу вимірювання**

(Варіант А або Б);

- висновок 1–2 речення: що саме буде обчислено під час обробки результатів.

### 3.4. Критерії оцінювання

Зміст звіту

1. Мета роботи.
2. таблиця з **паспортними даними** двигуна;
3. таблиця з **даними режиму ХХ** (заданими як виміряні);
4. короткий запис прийнятої **схеми/методу вимірювання**

(Варіант А або Б);

5. висновок 1–2 речення: що саме буде обчислено під час обробки результатів.

6. Результати — таблиця з розрахунками/

7. Висновок.


Підготовлена згідно робота у форматі файлу \*.docx або \*.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт (максимум 4 балів):

4 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи ; підготовано, логічно й обґрунтовано викладено та бездоганно оформлено звіт, який за змістом, обсягом, структурою відповідає вимогам; виявив високий рівень практичних умінь під час виконання завдань; упевнено та аргументовано здійснив захист лабораторної

3 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи , який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає, вимогам; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для переважно успішного розв'язання завдань; здійснив захист лабораторних з деякими неточностями у другорядному матеріалі, які виправив самостійно.

2 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для розв'язання переважної більшості



завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

1 бал - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено зі значними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою лише частково відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, що частково задовольняють для переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

### 3.5. Питання для самоперевірки

1. У чому полягає мета випробування електродвигуна в режимі холостого ходу?

2. Які умови вважаються режимом холостого ходу для асинхронного двигуна?

3. Які основні величини визначаються (вимірюються/задаються) під час випробування ХХ?

4. Чому струм холостого ходу  $I_0$  не дорівнює нулю навіть за відсутності навантаження?

5. Які складові входять до активної потужності холостого ходу  $P_0$ ?

6. Чим відрізняється  $\cos\varphi_0$  (у режимі ХХ) від номінального  $\cos\varphi_n$ ?

7. Запишіть формулу для повної потужності  $S_0$  у трифазній мережі та поясніть її складові.

8. Як визначити  $\cos\varphi_0$  за заданими  $U_L$ ,  $I_0$  та  $P_0$ ?

9. Як обчислюється реактивна потужність  $Q_0$  за відомими  $S_0$  і  $P_0$ ?

10. Яка фізична причина значної реактивної складової потужності в режимі ХХ?

11. За яких умов можливе насичення магнітопроводу і як це відобразиться на  $I_0$  та  $P_0$ ?

12. Які можливі причини підвищеного  $I_0$  у порівнянні з типовими значеннями?

13. Які можливі причини підвищеної  $P_0$  у порівнянні з типовими значеннями?


14. Як за результатами ХХ можна непрямо оцінити механічні втрати (тертя, вентиляція)?

15. Що таке мідні втрати статора  $P_{Cu1}$  і від чого вони залежать?

16. Наведіть формулу для  $P_{Cu1}$  та поясніть, яку величину струму треба підставляти для схем Y та  $\Delta$ .

17. Які наслідки для результатів дає неправильне з'єднання обмоток (Y/ $\Delta$ ) при заданій напрузі?

18. Як перевіряється симетрія струмів холостого ходу та що означає її порушення?

- 
19. Які несправності можуть проявлятися у вигляді шуму, вібрації або перегріву при ХХ?
  20. Які контрольні співвідношення використовують для перевірки правильності обчислень  $S_0$ ,  $\cos\varphi_0$ ,  $Q_0$ ?
  21. Як впливають напруга та частота живлення на  $I_0$  і  $P_0$  у режимі ХХ?
  22. Які висновки обов'язково потрібно подати у звіті за результатами випробування ХХ?

### 3.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навч. посіб. / В. В. Грабко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2020. 173 с.
2. Експлуатація та монтаж електрообладнання: методичні вказівки для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація та монтаж електрообладнання» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Р. В. Телюта, О.А.Козловський, В. В. Зінзура. Кропивницький : ЦНТУ, 2018 200 с.
3. Монтаж і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форми навчання / уклад. Ю.В. Грицюк. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 48 с.
4. Циганов О. М., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій. Миколаїв, 2022, 160 с.
5. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навчальний посібник / Грабко В. В., Бабій С. М., Мошноріз М. М. та ін. Вінниця : ВНТУ, 2011. 137 с.
6. Технологія електромонтажних робіт : підручник / В. В. Чорна, С. В. Чорний. Харків : Компанія СМІТ, 2014. 288 с.
7. Монтаж енергообладнання та систем керування : навч. посіб. для студентів вищ. навч. закл. / М. П. Кунденко та ін. Ч. І. Харків : ХНТУСГ, 2017. 282 с

#### 4.1 Основні теоретичні відомості

##### **Призначення центрування валів**

**Центрування (вирівнювання) валів** електричної машини та виконавчого механізму — це встановлення їхніх осей обертання у взаємно погоджене положення, яке забезпечує нормальну роботу муфти (пружної/жорсткої), мінімальні додаткові навантаження на підшипники та відсутність небезпечних вібрацій.

Правильно виконане центрування зменшує:

- вібрацію та шум агрегату;
- нагрів підшипників і муфти;
- зношування підшипників, ущільнень, елементів муфти;
- ризик руйнування валів/муфти та позапланових зупинок.

##### **Основні поняття та види неспіввісності**

Неспіввісність (misalignment) між валами зазвичай розглядають у двох взаємно перпендикулярних площинах: **вертикальній** та **горизонтальній**.

Розрізняють такі основні види:

1. **Паралельна (радіальна) неспіввісність** — осі валів паралельні, але зміщені на величину  $e$ (мм).
2. **Кутова неспіввісність** — осі перетинаються під кутом; у муфті спостерігається різниця зазорів по колу/діаметру.
3. **Комбінована** — найпоширеніший випадок (одночасно паралельна + кутова).
4. **Осьове зміщення (end float / axial)** — некоректне осьове положення напівмуфт (актуально для окремих типів муфт та машин).

**Ознаки неспіввісності:** підвищена вібрація на частоті  $1\times$  та/або  $2\times$  обертання, локальний нагрів муфти/підшипників, нерівномірний знос еластомерів/втулок, сліди підвищеного тертя.

##### **Причини виникнення неспіввісності**

Неспіввісність може виникати через:

- похибки монтажу на фундаменті (геометрія, перекоси);
- **«м'яку лапу» (soft foot)** — нерівномірне прилягання лап двигуна до плити/рами;
- деформації рами/фундаменту, осідання анкерів;
- теплове зміщення при нагріванні (thermal growth);
- зношення підшипників, люфти;
- неправильно підібрані або зношені елементи муфти.

##### **Вимоги до підготовки перед центруванням**

Перед вимірюваннями та корекцією положення агрегату необхідно:

- перевірити стан муфти (знос, тріщини, еластомер, посадки);

- усунути «м'яку лапу» (контроль щупом; типовий критерій — відсутність відриву/перекосу після затягування);
- перевірити затягування анкерів, стан плити/рами;
- забезпечити відсутність натягів від трубопроводів (для насосів/компресорів);
- зафіксувати базове положення напівмуфт і чистоту поверхонь.

### Методи центрування валів

У практиці застосовують:

1. **Лінійка + щупи** (орієнтовний метод)
  - Контроль паралельності — зазор між напівмуфтами/лінійкою по колу.
  - Недолік: низька точність, залежність від геометрії напівмуфт.
2. **Індикаторні методи** (основні у навчальних роботах)
  - **Rim (по ободу) + Face (по торцю)** — визначення паралельної та кутової складової за показами індикаторів.
  - **Reverse Dial (зворотні індикатори)** — підвищена точність, менша чутливість до биття торця; широко застосовується в ремонті та монтажі.
3. **Лазерне центрування**
  - Найвища точність і швидкість, автоматичний розрахунок корекцій; потребує відповідного обладнання.

У лабораторній роботі (теоретичне виконання) доцільно використовувати **індикаторну модель вимірювань**, де за «вихідні дані» приймаються покази індикаторів у кількох кутових положеннях ( $0^\circ$ – $90^\circ$ – $180^\circ$ – $270^\circ$ ).

### Принцип оцінювання кутової та паралельної складових (узагальнено)

Нехай під час повертання валів зафіксовано покази індикатора у протилежних точках (наприклад,  $0^\circ$  і  $180^\circ$ ). Тоді **різниця показів** характеризує подвоєну величину зміщення у відповідній площині.

- Для індикатора **по ободу (rim)** різниця показів дає оцінку **паралельного зміщення**:


$$e \approx \frac{\Delta_{180-0}}{2}$$

де  $\Delta_{180-0}$  — різниця показів індикатора в положеннях  $180^\circ$  та  $0^\circ$  (мм).

- Для індикатора **по торцю (face)** різниця показів дає оцінку **кутової неспіввісності** (через діаметр/радіус торця вимірювання):

$$\alpha \approx \frac{\Delta_{180-0}^{face}}{D} \text{ або } \alpha \approx \frac{\Delta_{180-0}^{face}}{2R}$$

де  $D$  — діаметр кола вимірювання по торцю,  $R = D/2$ .



Далі кутова складова перераховується у необхідну корекцію опор (лап) через відстані від площини муфти до передніх/задніх лап двигуна.

### **Розрахункова ідея корекції положення двигуна**

Корекцію виконують, як правило, переміщенням **однієї машини** (частіше електродвигуна):

- у **вертикальній площині** — підкладанням/зняттям регулювальних прокладок (shims) під лапи;
- у **горизонтальній площині** — зсувом корпуса (регулювальними гвинтами, домкратами).

У розрахунках використовують **геометричну подібність** (важільні співвідношення). Типова логіка:

- визначити паралельне зміщення  $e$  у площині;
- визначити кутову складову  $\alpha$ ;
- за відстанями від муфти до лап (наприклад,  $L_1$ — до передніх лап,  $L_2$ — до задніх) обчислити потрібні корекції:

$$\Delta_{front} = e + \alpha \cdot L_1, \Delta_{rear} = e + \alpha \cdot L_2$$

Знаки (+/–) визначаються прийнятою системою відліку індикатора і тим, у який бік потрібно зміщувати/піднімати машину.

### **Допуски центрування**

Допуски залежать від:

- частоти обертання,
- типу муфти,
- класу точності агрегату та вимог виробника.

Загальний принцип: **чим вища швидкість — тим жорсткіші допуски**. У навчальних розрахунках допуск задається викладачем або приймається умовно (наприклад, на рівні десятих/сотих мм для індикаторних методів).

## 4.2 Порядок виконання роботи

### **1. Мета та вихідні умови**

1. Ознайомитися з сутністю центрування валів електричної машини та виконавчого механізму.

2. Відпрацювати порядок контролю **паралельної** та **кутової** неспіввідповідності індикаторним методом.

3. За заданими (умовними) вимірними даними:

- визначити величини неспіввідповідності у вертикальній та горизонтальній площинах;
- розрахувати корекції положення електродвигуна (прокладки під лапи та/або горизонтальні зсуви);
- виконати перевірочний розрахунок після «внесення корекцій».

У роботі приймаємо, що **нерухомою базою** є виконавчий механізм, а **регулюється електродвигун**.

## 2. Підготовка до центрування (за методикою)

2.1. Перевірити комплектність вузла: електродвигун, виконавчий механізм, муфта (напівмуфти), кріплення, регулювальні прокладки (shims).

2.2. Прийняти контрольні відстані (за схемою установки):

- $L_1$  — відстань від площини муфти до **передніх** лап двигуна, мм;
- $L_2$  — відстань від площини муфти до **задніх** лап двигуна, мм;
- $D$  (або  $R$ ) — діаметр (або радіус) кола вимірювання по торцю напівмуфти, мм.

2.3. Виключити «м'яку лапу» (методично): вважати, що опорні площини рівні, прокладки підібрані коректно, кріплення затягнуте рівномірно.

2.4. Установити систему відліку кутових положень при провертаннях:

- $0^\circ$  — верхня точка (Top),
- $90^\circ$  — права (Right),
- $180^\circ$  — нижня (Bottom),
- $270^\circ$  — ліва (Left).

## 3. Схема вимірювання та зняття показів індикаторів (модель)

У теоретичному виконанні використовується одна з типових індикаторних схем. Рекомендована для розрахунків у навчальній роботі:

### Схема A: Rim + Face

- Індикатор **Rim** (по ободу) — вимірювання радіальної складової (паралельне зміщення).

- Індикатор **Face** (по торцю) — вимірювання кутової складової.

3.1. «Закріпити» індикатори на одній напівмуфті так, щоб наконечники торкалися відповідно:

- обода другої напівмуфти (Rim);
- торця другої напівмуфти по колу вимірювання (Face).

3.2. Прийняти нульове положення індикаторів у точці  $0^\circ$  (або фіксувати абсолютні значення — за умовою завдання).

3.3. Виконати «провертання» валів синхронно та записати покази індикаторів у 4 положеннях:

- $I_{R0}, I_{R90}, I_{R180}, I_{R270}$  — для Rim;
- $I_{F0}, I_{F90}, I_{F180}, I_{F270}$  — для Face.

У теоретичній роботі ці значення **задаються у вихідних даних** (у розділі 4.3). Ви виконуєте лише їх обробку та розрахунок корекцій.

## 4. Обчислення неспіввісності за показами (для двох площин)

Розрахунки виконують **окремо** для вертикальної та горизонтальної площин.

### 4.1. Вертикальна площина (Top–Bottom)

4.1.1. Для Rim:

$$\Delta R_V = I_{R180} - I_{R0}$$

4.1.2. Для Face:

$$\Delta F_V = I_{F180} - I_{F0}$$

## 4.2. Горизонтальна площина (Right–Left)

4.2.1. Для Rim:

$$\Delta R_H = I_{R90} - I_{R270}$$

4.2.2. Для Face:

$$\Delta F_H = I_{F90} - I_{F270}$$

## 5. Перехід від різниць показів до параметрів зміщення

5.1. Паралельне зміщення (радіальне) у площині:

$$e \approx \frac{\Delta R}{2}$$

де  $\Delta R$ — відповідна різниця для вертикалі або горизонталі.

5.2. **Кутова складова** у площині (за торцевим індикатором):

$$\alpha \approx \frac{\Delta F}{D} \text{ (рад, якщо } \Delta F \text{ та } D \text{ в одних одиницях)}$$

або еквівалентно через радіус:

$$\alpha \approx \frac{\Delta F}{2R}$$

У навчальних розрахунках допустимо використовувати  $\alpha$  як «геометричний ухил» (мм/мм), що далі множиться на відстань до лап.

## 6. Розрахунок корекцій положення двигуна

Для кожної площини (вертикальної та горизонтальної) визначити корекції у точках опор двигуна.

6.1. Корекція в площині муфти (умовно):


- паралельна складова:  $e$ ,
- кутова складова:  $\alpha$ .

6.2. Корекції для лап двигуна:

$$\begin{aligned}\Delta_{front} &= e + \alpha \cdot L_1 \\ \Delta_{rear} &= e + \alpha \cdot L_2\end{aligned}$$

**Вертикальна площина:** Дреалізують підкладанням/зняттям прокладок під передні та задні лапи (окремо по лівій/правій лапі — за потреби, якщо враховується перекіс рами).

**Горизонтальна площина:** Дреалізують зсувом двигуна вліво/вправо (регулювальними гвинтами/домкратами).



Знаки корекцій визначаються так: якщо після «внесення корекції» потрібно зменшити показ індикатора в певній точці, зміщення/піднімання виконують у протилежний бік до виявленого відхилення. У розділі 4.3 (обробка) це буде формалізовано через таблицю знаків.

## 7. Перевірочний етап

7.1. До вихідних показів застосувати розраховані корекції (моделювання виправлення).

7.2. Розрахувати «післякоригувальні» різниці  $\Delta R$  та  $\Delta F$ .

7.3. Переконалися, що залишкова неспіввісність не перевищує заданий допуск (за умовою варіанта).

## 8. Оформлення результатів

У звіті подати:

- схему вимірювання (обрану методику);
- таблицю показів індикаторів у 4 положеннях;
- розрахунок  $\Delta R$ ,  $\Delta F$ ,  $e$ ,  $\alpha$  для вертикалі та горизонталі;
- розрахунок  $\Delta_{front}$ ,  $\Delta_{rear}$  (прокладки/зсуви);
- висновок про відповідність допускам.

### 4.3 Обробка результатів вимірювання

#### Вихідні дані (задаються у варіанті)

Для розрахунків приймаються такі дані:

##### 1) Геометричні параметри установки

- $L_1$ — відстань від площини муфти до передніх лап двигуна, мм;
- $L_2$ — відстань від площини муфти до задніх лап двигуна, мм;
- $D$ — діаметр кола вимірювання по торцю напівмуфти (для індикатора Face), мм;
- (за потреби)  $R = D/2$ .

##### 2) Покази індикаторів у 4 кутових положеннях

Кутові положення:  $0^\circ$  (верх),  $90^\circ$  (право),  $180^\circ$  (низ),  $270^\circ$  (ліво).

- Індикатор **Rim** (по ободу):
- $I_{R0}, I_{R90}, I_{R180}, I_{R270}$ , мм
- Індикатор **Face** (по торцю):
- $I_{F0}, I_{F90}, I_{F180}, I_{F270}$ , мм

##### 3) Допуск на центрування (умовно задається)

- для паралельної складової  $e_{dop}$ , мм;
- для кутової складової  $\alpha_{dop}$  (мм/мм або мм/100 мм), або допустима різниця торцевих показів  $\Delta F_{dop}$ , мм.

### Таблиця для занесення показів (форма)

Заповнюється за вихідними даними варіанта.

Положення	0° (Top)	90° (Right)	180° (Bottom)	270° (Left)
Rim, $I_R$ , мм				
Face, $I_F$ , мм				

### Розрахунок різниць показів у двох площинах

Розрахунки виконують окремо для **вертикальної** та **горизонтальної** площини.

#### 1) Вертикальна площина (0°–180°)

$$\Delta R_V = I_{R180} - I_{R0}$$

$$\Delta F_V = I_{F180} - I_{F0}$$

#### 2) Горизонтальна площина (90°–270°)

$$\Delta R_H = I_{R90} - I_{R270}$$

$$\Delta F_H = I_{F90} - I_{F270}$$

Оформити у таблиці:

Площина	$\Delta R$ , мм	$\Delta F$ , мм
Вертикальна $V$		
Горизонтальна $H$		

### Визначення паралельної та кутової складових неспіввісності

#### 1) Паралельна (радіальна) складова

$$e_V = \frac{\Delta R_V}{2}, e_H = \frac{\Delta R_H}{2}$$

#### 2) Кутова складова (як ухил, мм/мм)

$$\alpha_V = \frac{\Delta F_V}{D}, \alpha_H = \frac{\Delta F_H}{D}$$

За потреби подання у мм/100 мм:

$$\alpha_{(\text{мм}/100 \text{ мм})} = \alpha \cdot 100$$

Таблиця результатів:

Площина	$e$ , мм	$\alpha$ , мм/мм	$\alpha$ , мм/100 мм
Вертикальна $V$			
Горизонтальна $H$			

## Розрахунок корекцій для передніх і задніх лап двигуна

Корекції обчислюються за відстанями  $L_1$  та  $L_2$ .

Для кожної площини:

$$\Delta_{front} = e + \alpha \cdot L_1$$

$$\Delta_{rear} = e + \alpha \cdot L_2$$

де  $\Delta_{front}$  — корекція у зоні передніх лап двигуна;

$\Delta_{rear}$  — корекція у зоні задніх лап двигуна.

Оформити у таблиці:

Площина	$\Delta_{front}$ , мм	$\Delta_{rear}$ , мм	Спосіб реалізації
Вертикальна $V$			Прокладки під лапи
Горизонтальна $H$			Зсув двигуна

## Правила інтерпретації знаків і практичний зміст корекцій

Оскільки в роботі використано теоретичні покази, у звіті необхідно **словесно** пояснити напрям корекцій.

Рекомендоване правило (для оформлення в методичних вказівках):

- якщо  $\Delta_{front} > 0$  у вертикальній площині — **підняти** передні лапи на  $|\Delta_{front}|$  мм (додати прокладки);
- якщо  $\Delta_{front} < 0$  — **опустити** передні лапи на  $|\Delta_{front}|$  мм (зняти прокладки);
- аналогічно для  $\Delta_{rear}$ .

Для горизонтальної площини:

- $\Delta_{front} > 0$  — зсунути передню частину двигуна **вправо** (умовно, якщо прийнята позитивна вісь вправо);
- $\Delta_{front} < 0$  — зсунути **вліво**.
- У звіті обов'язково вказати прийнятий напрям позитивної осі.

## Перевірочний розрахунок (теоретичний контроль якості центрування)

1. Порівняти отримані  $e_V, e_H$  з допуском  $e_{dop}$ .
2. Порівняти  $\alpha_V, \alpha_H$  з  $\alpha_{dop}$  (або  $\Delta F$  з  $\Delta F_{dop}$ ).
3. Зробити висновок:
  - «центрування в межах допуску / не в межах допуску»;
  - які саме корекції необхідні (прокладки/зсув).

## Вихідні дані

**Прийнято:** індикатори «обнулені» у положенні  $0^\circ$  (Top), тобто

$I_{R0} = 0.000$  мм та  $I_{F0} = 0.000$  мм для всіх варіантів.

Кутові положення:  $0^\circ$  (Top),  $90^\circ$  (Right),  $180^\circ$  (Bottom),  $270^\circ$  (Left).

**Допуски (для всіх варіантів):**

- допустиме паралельне зміщення:  $e_{dop} = 0.05\text{мм}$ ;
- допустима торцева різниця:  $\Delta F_{dop} = 0.08\text{мм}$  (в кожній площині).

### Варіант 1

**Геометрія:**  $L_1 = 120\text{мм}$ ;  $L_2 = 320\text{мм}$ ;  $D = 160\text{мм}$

**Rim, мм:**  $I_{R0} = 0.000$ ;  $I_{R90} = +0.060$ ;  $I_{R180} = +0.120$ ;  $I_{R270} = +0.010$

**Face, мм:**  $I_{F0} = 0.000$ ;  $I_{F90} = -0.040$ ;  $I_{F180} = -0.060$ ;  $I_{F270} = +0.010$

### Варіант 2

**Геометрія:**  $L_1 = 140\text{мм}$ ;  $L_2 = 360\text{мм}$ ;  $D = 180\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $+0.020$ ;  $+0.080$ ;  $-0.040$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $+0.030$ ;  $+0.070$ ;  $-0.020$

### Варіант 3

**Геометрія:**  $L_1 = 110\text{мм}$ ;  $L_2 = 300\text{мм}$ ;  $D = 150\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $-0.050$ ;  $-0.110$ ;  $-0.020$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $-0.020$ ;  $-0.090$ ;  $-0.060$

### Варіант 4

**Геометрія:**  $L_1 = 160\text{мм}$ ;  $L_2 = 420\text{мм}$ ;  $D = 200\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $+0.090$ ;  $+0.140$ ;  $+0.020$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $+0.020$ ;  $-0.040$ ;  $-0.010$

### Варіант 5

**Геометрія:**  $L_1 = 130\text{мм}$ ;  $L_2 = 340\text{мм}$ ;  $D = 170\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $-0.030$ ;  $+0.060$ ;  $-0.080$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $-0.010$ ;  $+0.050$ ;  $-0.040$

### Варіант 6

**Геометрія:**  $L_1 = 150\text{мм}$ ;  $L_2 = 380\text{мм}$ ;  $D = 190\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $+0.040$ ;  $-0.020$ ;  $-0.060$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $+0.060$ ;  $+0.020$ ;  $-0.030$

### Варіант 7

**Геометрія:**  $L_1 = 125\text{мм}$ ;  $L_2 = 330\text{мм}$ ;  $D = 160\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $-0.070$ ;  $-0.130$ ;  $-0.050$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $+0.010$ ;  $-0.050$ ;  $-0.020$

### Варіант 8

**Геометрія:**  $L_1 = 170\text{мм}$ ;  $L_2 = 450\text{мм}$ ;  $D = 210\text{мм}$

**Rim, мм:**  $0.000$ ;  $+0.010$ ;  $+0.090$ ;  $+0.050$

**Face, мм:**  $0.000$ ;  $-0.050$ ;  $-0.030$ ;  $+0.020$

## Варіант 9

Геометрія:  $L_1 = 135\text{мм}$ ;  $L_2 = 355\text{мм}$ ;  $D = 180\text{мм}$

Rim, мм: 0.000; -0.020; -0.090; -0.060

Face, мм: 0.000; +0.040; +0.080; +0.010

## Варіант 10

Геометрія:  $L_1 = 145\text{мм}$ ;  $L_2 = 400\text{мм}$ ;  $D = 200\text{мм}$

Rim, мм: 0.000; +0.070; +0.020; -0.030

Face, мм: 0.000; -0.020; +0.060; +0.030

## Шаблон для звіту

### 1) Вихідні дані

$L_1 = \text{__ мм}$ ;  $L_2 = \text{__ мм}$ ;  $D = \text{__ мм}$ ;

Допуски:  $e_{dop} = \text{__ мм}$ ;  $\Delta F_{dop} = \text{__ мм}$

### 2) Покази індикаторів

Положення	0° (Top)	90° (Right)	180° (Bottom)	270° (Left)
Rim, $I_R$ , мм				
Face, $I_F$ , мм				

### 3) Різниці показів у площинах

Площина	$\Delta R$ , мм	Формула	$\Delta F$ , мм	Формула
Вертикальна (0°–180°)		$I_{R180} - I_{R0}$		$I_{F180} - I_{F0}$
Горизонтальна (90°–270°)		$I_{R90} - I_{R270}$		$I_{F90} - I_{F270}$

### 4) Паралельна та кутова складові

Площина	$e = \Delta R/2$ , мм	$\alpha = \Delta F/D$ , мм/мм	Перевірка допусків
Вертикальна			(
Горизонтальна			(

### 5) Корекції для лап двигуна

Площина	$\Delta_{front} = e + \alpha L_1$ , мм	$\Delta_{rear} = e + \alpha L_2$ , мм	Реалізація
Вертикальна			прокладки під лапи
Горизонтальна			зсув двигуна

## 4.4. Критерії оцінювання

### Зміст звіту

- Мета роботи.
- Вихідні данні
- схему вимірювання (обрану методичку);
- таблицю показів індикаторів у 4 положеннях;

- розрахунок  $\Delta R$ ,  $\Delta F$ ,  $e$ ,  $\alpha$  для вертикалі та горизонталі;
- розрахунок  $\Delta_{front}$ ,  $\Delta_{rear}$  (прокладки/зсуви);
- висновок про відповідність допускам.

### **Висновок до лабораторної роботи (структура)**

У висновку (3–5 речень) зазначити:

- що визначено (паралельна та кутова неспіввісність у двох площинах);
- які корекції розраховано (для передніх/задніх лап, вертикаль/горизонталь);
- чи відповідає результат допускам;
- що є критичним для точності (правильність зняття показів, відсутність «м'якої лапи», урахування геометричних відстаней).

Підготовлена згідно робота у форматі файлу \*.docx або \*.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.


Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт (максимум 4 балів):

4 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи ; підготовано, логічно й обґрунтовано викладено та бездоганно оформлено звіт, який за змістом, обсягом, структурою відповідає вимогам; виявив високий рівень практичних умінь під час виконання завдань; упевнено та аргументовано здійснив захист лабораторної

3 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи , який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає, вимогам; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для переважно успішного розв'язання завдань; здійснив захист лабораторних з деякими неточностями у другорядному матеріалі, які виправив самостійно.

2 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для розв'язання переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

1 бал - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено зі значними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою лише частково відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, що частково задовольняють для переважної



більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

#### 4.5. Питання для самоперевірки

1. Яка основна мета центрування валів електричної машини та виконавчого механізму?
2. Які наслідки для агрегату має робота з неспіввісністю валів (вібрація, підшипники, муфта)?
3. Назвіть і поясніть види неспіввісності: паралельна, кутова, комбінована, осьова.
4. Чому контроль неспіввісності виконують окремо у вертикальній та горизонтальній площинах?
5. Які типові причини виникнення неспіввісності після монтажу або під час експлуатації?
6. Що таке «м'яка лапа» (soft foot) і як вона впливає на результати центрування?
7. Які підготовчі перевірки необхідно виконати перед центруванням (муфта, кріплення, фундамент, трубопроводи)?
8. Які методи центрування застосовують на практиці (лінійка-щуп, індикаторні методи, лазерний метод)?
9. У чому полягає метод Rim + Face і які складові неспіввісності він дозволяє визначити?
10. У чому переваги методу Reverse Dial порівняно з Rim + Face (узагальнено)?
11. Які кутові положення приймають при провертаннях ( $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$ ,  $270^\circ$ ) і що вони означають?
12. Чому важливо провертати вали синхронно під час зняття показів?
13. Як обчислюють різниці показів індикатора Rim у вертикальній площині та що вони фізично означають?
14. Як обчислюють різниці показів індикатора Rim у горизонтальній площині?
15. Як обчислюють різниці показів індикатора Face у вертикальній і горизонтальній площинах?
16. Чому паралельне зміщення визначають як  $e = \Delta R/2$ ? Який фізичний зміст ділення на 2?
17. Як визначається кутова складова  $\alpha$  через  $\Delta F_i$  діаметр кола вимірювання  $D$ ?
18. Яка розмірність  $\alpha$  (мм/мм) і як її зручно подавати у мм/100 мм?
19. Для чого у розрахунках потрібні відстані  $L_1$  і  $L_2$  (до передніх і задніх лап двигуна)?
20. Поясніть зміст формул  $\Delta_{front} = e + \alpha L_1$ ,  $\Delta_{rear} = e + \alpha L_2$ .
21. Якими способами реалізують корекції у вертикальній площині?

22. Якими способами реалізують корекції у горизонтальній площині?

23. Від чого залежать допуски на центрування (швидкість, тип муфти, вимоги виробника)?

24. Які критерії використовують для оцінювання якості центрування у звіті (порівняння з допусками  $e_{dop}$ ,  $\Delta F_{dop}$ )?

25. Що має містити висновок за результатами теоретичного центрування (що визначено, які корекції потрібні, чи в межах допусків)?

#### 4.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навч. посіб. / В. В. Грабко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2020. 173 с.

2. Експлуатація та монтаж електрообладнання: методичні вказівки для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація та монтаж електрообладнання» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Р. В. Телюта, О.А.Козловський, В. В. Зінзура. Кропивницький : ЦНТУ, 2018 200 с.

3. Монтаж і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форми навчання / уклад. Ю.В. Грицюк. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 48 с.

4. Циганов О. М., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій. Миколаїв, 2022, 160 с.



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5 АНАЛІЗ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОМОНТАЖУ ЗА СХЕМАМИ ВТОРИННИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи. Набути практичних навичок діагностики, пошуку та усунення несправностей в електронних приладах і системах автоматизації електроприводу; навчитися вимірювати параметри елементів, аналізувати відхилення від норми, виконувати ремонт і перевірку працездатності після заміни несправних компонентів.

### 5.1. Основі теоретичні відомості

Сучасні системи автоматизації електроприводів являють собою складні електронно-обчислювальні комплекси, у яких поєднуються силові електронні модулі, мікропроцесорні контролери, аналого-цифрові перетворювачі, датчики та пристрої зворотного зв'язку. Їхня надійність і точність безпосередньо визначають стабільність роботи всього електропривода — двигуна, виконавчих механізмів і виробничих процесів.

Будь-яка відмова окремого елемента — датчика, підсилювача, стабілізатора або модуля керування — призводить до порушення алгоритму керування, аварійного зупину або неправильного регулювання швидкості, моменту чи положення двигуна. Тому діагностика, локалізація та усунення несправностей у таких системах є критично важливою частиною технічного обслуговування електроприводів.

### 2. Основні елементи електронних систем автоматизації електроприводу

1. Датчики — перетворюють фізичні величини в електричний сигнал, що надходить на модуль керування.

- *Датчики струму* (на ефекті Холла, шунти) — формують сигнал 0–5 В або 4–20 мА пропорційно струму двигуна.

- *Датчики швидкості* (енкодери, тахогенератори, датчики Холла) — забезпечують імпульсний або аналоговий сигнал зворотного зв'язку.


- *Датчики температури* (Pt100, термістори, термопари) — контролюють нагрів двигуна або силових модулів.

- *Датчики положення/рівня/тиску* — формують дискретний сигнал або аналогову напругу.

2. Регулятори та модулі керування  
Це центральна частина системи автоматизації, що забезпечує обробку сигналів і формування команд для виконавчих елементів.

- *Аналогові регулятори* — базуються на операційних підсилювачах, РС-ланцюгах, потенціометрах.

- *Цифрові регулятори (ПЛК, мікроконтролери)* — виконують програмне регулювання (PID, PI, логічне, адаптивне).



- ШІМ-регулятори (PWM) — формують імпульсні сигнали для управління транзисторними ключами (IGBT, MOSFET).

3. Силкові модулі — забезпечують комутацію струмів у колі двигуна. Основні елементи:

- Діоди, транзистори, IGBT-модулі, тиристори;
- Стабілізатори, випрямлячі, драйвери затворів;
- RC- та LC-фільтри для зниження гармонік.

4. Комунікаційні модулі — реалізують обмін даними між пристроями:

- RS-485 / Modbus RTU, CANopen, Profibus, Ethernet;
- перетворюють логічні рівні, забезпечують ізоляцію та захист від завад.

3. Види несправностей електронних систем

Електричні несправності:

- Обрив провідників або доріжок друкованої плати.
- Коротке замикання елементів (пробій діода, транзистора).
- Втрата ємності конденсатора, зміна опорного резистора.
- Пошкодження стабілізатора напруги.
- Перегрів, нагар, окиснення контактів.

Функціональні (логічні) несправності:

- Зміщення нуля або масштабна похибка у сигналі датчика.
- Відсутність імпульсів з енкодера.
- Помилки у зчитуванні АЦП (спотворення або насичення сигналу).

- Відмова модуля керування ШІМ.
- Втрата зв'язку між ПЛК і перетворювачем частоти.

Програмні збої:

- Втрата конфігурації контролера або помилки прошивки.
- Невідповідність параметрів у ПЧ і ПЛК.
- Некоректна робота алгоритмів PID-регулятора через хибні дані з датчиків.

4. Методи діагностики електронних систем

1. Візуальна діагностика

- огляд друкованих плат, роз'ємів, з'єднань;
- пошук потемнілих, перегрітих або тріснутих компонентів;
- виявлення механічних пошкоджень доріжок.

2. Електричне тестування

- перевірка напруг живлення, рівнів сигналів, цілісності ланцюгів;
- вимірювання опорів, струмів, падін напруги;
- контроль стабільності живлення осцилографом.

3. Функціональна діагностика

- перевірка реакції системи на подані сигнали;
- тестування входів/виходів ПЛК через діагностичне ПЗ;

- перевірка правильності формування ШІМ, дискретних і аналогових сигналів.

4. Метод порівняння з еталонними значеннями

- порівняння вимірних параметрів із паспортними або номінальними;

- пошук відхилень, які свідчать про деградацію елементів.

5. Теплова діагностика

- контроль температури корпусів транзисторів, діодів, стабілізаторів;

- виявлення перегріву, який свідчить про підвищений струм або паразитні втрати.

6. Програмна діагностика

- зчитування кодів помилок, логів або статусних бітів у системі керування;

- використання утиліт типу *SoMove*, *EcoStruxure Machine Expert*, *Tia Portal Diagnostic Buffer* тощо.

5. Алгоритм пошуку несправностей

1. Аналіз симптомів відмови системи (відсутність реакції, миготіння індикаторів, перегрів, шум).

2. Огляд вузлів живлення та елементів захисту.

3. Перевірка сигналів керування і зворотного зв'язку.

4. Визначення ділянки схеми з відхиленням параметрів.

5. Тестування елементів (резисторів, діодів, транзисторів, мікросхем).

6. Заміна або перепаювання несправних елементів.

7. Контрольна перевірка працездатності після ремонту.

8. Внесення запису у журнал технічного обслуговування.

6. Типові причини виходу з ладу компонентів

Елемент	Характерна несправність	Причина	Наслідки
Резистор	Зміна опору, обрив	Перегрів, старіння	Зміна параметрів сигналу
Конденсатор	Втрата ємності, пробій	Перевантаження, старіння	Пульсації напруги, шум
Діод	Пробій, обрив	Стрибок напруги	Втрата випрямлення
Транзистор	Пробій переходу, витік	Перегрів, КЗ	Відсутність керування
Мікросхема	Вихід з ладу входів/виходів	Перенапруга, ЕСР	Збій у логіці або відсутність сигналу
Оптрон	Зниження коефіцієнта передачі	Старіння світлодіода	Втрата ізоляції або зв'язку
Стабілізатор	Втрата стабілізації	Перегрів	Нестабільність живлення системи

## 7. Техніка безпеки при діагностиці і ремонті

- Перед вимірюваннями відключати пристрій від мережі.
- Заборонено працювати з увімкненими силовими колами без ізоляції.
- Використовувати антистатичний браслет при роботі з мікросхемами.
- Паяльне обладнання має бути заземленим.
- Перевіряти правильність полярності перед подачею живлення.
- Не допускати перевищення граничних напруг при вимірюваннях.

## 8. Перевірка після ремонту

Після усунення несправності виконують:

1. Контроль електричних параметрів: живлення, струми, рівні сигналів.
2. Функціональну перевірку: реакція системи на вхідні сигнали, стабільність роботи регуляторів.
3. Тестування під навантаженням: оцінка температури елементів, відсутність коливань і шумів.
4. Документування результатів: фіксація дати ремонту, заміненних деталей, результатів тестування.

## 9. Прилади та обладнання для практичної діагностики

- Мультиметр — вимірювання напруг, опорів, струмів.
- Осцилограф — аналіз форми сигналів і частоти імпульсів.
- Генератор сигналів — подача тестових імпульсів або аналогових рівнів.
- Паяльна станція з регулюванням температури — демонтаж і монтаж елементів.
- Тестер напівпровідників — визначення працездатності транзисторів, діодів.
- Програмне середовище (*SoMove, ZelioSoft, Machine Expert, Tia Portal*) — діагностика ПЛК, ПЧ, модулів.

## 10. Роль діагностики в експлуатації електроприводів

Своєчасна діагностика дозволяє:

- попередити відмови і аварійні зупинки обладнання;
- скоротити витрати на ремонт і простої;
- підтримувати точність та стабільність технологічних процесів;
- підвищити безпеку персоналу та надійність системи автоматизації.

Регулярне технічне обслуговування, моніторинг стану та аналіз діагностичних даних є необхідними умовами ефективної експлуатації електроприводів у промислових системах.

## 5.2 Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись зі схемою досліджуваного модуля (датчик, регулятор, плата керування).
2. Провести візуальний огляд елементів, виявити можливі пошкодження або сліди перегріву.
3. Виконати вимірювання основних параметрів (напруг, опорів, сигналів) у контрольних точках.
4. Порівняти виміряні дані з номінальними, визначити відхилення.
5. Встановити несправний елемент або ділянку кола.
6. Провести заміну несправного компонента та перевірити правильність монтажу.
7. Подати живлення, виконати повторні вимірювання після ремонту.
8. Зробити висновки щодо причини несправності та ефективності ремонту.
9. Оформити короткий звіт із таблицею результатів та висновком.

## 5.3. Обробка результатів вимірювання

Варіант 1. Діагностика кола живлення контролера

Умова: Модуль керування отримує живлення 24 В DC через стабілізатор 5 В. Після вмикання живлення контролер не реагує.

Контрольна точка    Номінальна напруга, В    Виміряна напруга, В

Вхід стабілізатора	24	24
Вихід стабілізатора	5,0	0,8
Вхід контролера	5,0	0,7

Завдання:

1. Визначити тип несправності та її можливу причину.
2. Пояснити, який елемент вийшов з ладу.
3. Запропонувати спосіб ремонту.

Варіант 2. Діагностика кола датчика температури

Умова: Датчик температури типу Pt100 підключений до аналогового входу контролера. Покази на дисплеї нестабільні.

Параметр	Номінальне значення	Виміряне значення
Опір датчика при 25 °C	109,7 Ом	72,5 Ом
Напруга на вході АЦП	2,7 В	1,4 В
Опір з'єднувального кабелю	≤ 0,5 Ом	2,3 Ом

Завдання:

1. Зробити висновок щодо стану датчика і кабелю.
2. Вказати причину відхилень показів.
3. Пояснити, як усунути несправність.

### Варіант 3. Виявлення несправності в модулі ШІМ-керування

Умова: На виході модуля має формуватись імпульсний сигнал частотою 2 кГц, заповнення 60 %. Вимірювання проводяться осцилографом.

Параметр	Номінальне	Виміряне
Частота сигналу	2 кГц	1,9 кГц
Заповнення імпульсу	60 %	0 %
Напруга на виході	5 В	0 В

Завдання:

1. Пояснити причину відсутності імпульсу.
2. Визначити, який елемент (мікроконтролер, драйвер, транзистор) може бути несправним.
3. Обґрунтувати дії з ремонту.

### Варіант 4. Тестування аналогового входу контролера

Умова: На вхід модуля подано напругу 0–10 В. Зчитування здійснюється програмою ПЛК.

Напруга на вході (В)	Показання ПЛК (В)
0	0,1
2	2,2
5	6,0
8	9,9
10	12,4

Завдання:

1. Пояснити характер несправності (зміщення, масштабна похибка, спотворення).
2. Визначити, у якому вузлі кола (дільник, АЦП, фільтр) імовірна помилка.
3. Запропонувати метод відновлення точності.

### Варіант 5. Перевірка ланцюга зворотного зв'язку по струму

Умова: Датчик струму (тип Холла) передає сигнал 0–5 В при струмі 0–50 А. Двигун під навантаженням споживає 25 А, але контролер показує лише 10 А.

Параметр	Номінальне	Виміряне
Вихід датчика (В)	2,5 В	1,1 В
Напруга живлення датчика (В)	5,0 В	5,0 В
Опір вихідного ланцюга (кОм)	10	18

Завдання:

1. Визначити тип несправності (зсув нуля, обрив, деградація елемента).

2. Вказати, який компонент потребує заміни.
3. Пояснити вплив цієї несправності на роботу електроприводу.

#### Варіант 6. Діагностика сигналу з енкодера

Умова: Система контролю швидкості двигуна використовує імпульсний енкодер. Під час роботи з'являються пропуски сигналів.

Параметр	Номінальне Виміряне	
Амплітуда сигналу (В)	5,0	2,8
Частота імпульсів при 1500 об/хв	1500 Гц	1320 Гц
Опір лінії з'єднання (Ом)	≤ 1,0	4,5

Завдання:

1. Визначити джерело помилки (енкодер чи лінія зв'язку).
2. Пояснити можливий механізм спотворення сигналу.
3. Запропонувати дії для усунення несправності.

#### Варіант 7. Діагностика плати живлення

Умова: Модуль живлення має видавати стабілізовану напругу 12 В. Користувач скаржить на періодичне вимикання системи.

Контрольна точка	Напруга (В)
Вхід моста випрямлення	18 В
Вихід моста	17,5 В
Вихід стабілізатора	11,0 В (з пульсаціями ±0,7 В)

Завдання:

1. Пояснити причину нестабільності вихідної напруги.
2. Вказати елемент, який, імовірно, вийшов з ладу.
3. Запропонувати дії для ремонту і перевірки після заміни.

#### Варіант 8. Аналіз кола ШІМ-регулятора вентилятора

Умова: Керування швидкістю вентилятора здійснюється сигналом 25 кГц, 40 % заповнення. Після запуску вентилятор працює лише на повній швидкості.

Параметр	Номінальне Виміряне	
Частота сигналу	25 кГц	25 кГц
Заповнення імпульсу	40 %	100 %
Напруга на базі транзистора	3,2 В	0 В

Завдання:

1. Пояснити причину несправності.
2. Вказати несправний елемент.
3. Пояснити, як заміна транзистора вплине на роботу вузла.

#### Варіант 9. Відсутність обміну по Modbus RTU

Умова: Модуль ПЛК не зчитує дані від перетворювача частоти.  
Перевірка лінії RS-485.

Параметр	Номінальне	Виміряне
Напруга між А–В (лінія неактивна)	200 мВ	200 мВ
Сигнал TX амплітуда	5,0 В	0,5 В
Опір між А–В (термінатор)	120 Ом	120 Ом

Завдання:

1. Визначити, який вузол несправний (трансивер, кабель, порт ПЛК).
2. Пояснити, чому відсутня передача даних.
3. Запропонувати заходи відновлення зв'язку.

Варіант 10. Діагностика плати індикації

Умова: Світлодіодна панель індикації стану електроприводу не світиться.

Параметр	Номінальне	Виміряне
Напруга живлення плати	12 В	12 В
Напруга на резисторі обмеження	2,2 В	0,0 В
Напруга на аноді LED	2,0 В	0,0 В

Завдання:

1. Вказати характер несправності (обрив, коротке замикання, пробій).
2. Пояснити причину відсутності світіння.
3. Запропонувати метод перевірки і відновлення працездатності.


Вказівки до оформлення звіту

1. У таблиці результатів показати виміряні та номінальні параметри.
2. Пояснити характер виявленої несправності та її вплив на роботу системи.
3. Навести схематичне позначення вузла, у якому виконано діагностику.
4. Додати висновки: тип несправності, причина, спосіб усунення, результат перевірки після ремонту.

5.4. Критерії оцінювання

**Зміст звіту**

1. Назва та мета роботи.
2. Схема досліджуваного вузла або фрагмент електронного блоку.
3. Таблиця результатів діагностики.
4. Фото або ескіз несправного елемента.

- 
5. Короткий опис виконаних дій із ремонту.
  6. Висновки щодо причини відмови і способу її усунення.

Підготовлена згідно робота у форматі файлу \*.docx або \*.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Підготовлена згідно робота у форматі файлу \*.docx або \*.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт (максимум 4 балів):

4 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи ; підготовано, логічно й обґрунтовано викладено та бездоганно оформлено звіт, який за змістом, обсягом, структурою відповідає вимогам; виявив високий рівень практичних умінь під час виконання завдань; упевнено та аргументовано здійснив захист лабораторної

3 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи , який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає, вимогам; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для переважно успішного розв'язання завдань; здійснив захист лабораторних з деякими неточностями у другорядному матеріалі, які виправив самостійно.

2 бали - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено з певними незначними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою в основному відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, необхідний для розв'язання переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

1 бал - повністю виконано програму лабораторної роботи; підготовано, викладено зі значними порушеннями послідовності та оформлено звіт з лабораторної роботи, який за змістом, обсягом, структурою лише частково відповідає вимогам, але визначається неточностями, порушенням логіки; виявив рівень умінь під час виконання завдань лабораторної, що частково задовольняють для переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які виправив з допомогою викладача.

## 5.5. Питання для перевірки

1. Які основні вузли входять до складу системи автоматизації електроприводу?
2. Які типи несправностей найчастіше зустрічаються в електронних приладах керування?
3. Як визначити несправність датчика температури чи струму?
4. Які методи використовують для діагностики електронних схем?
5. У чому полягає принцип роботи PID-регулятора?
6. Як виконати перевірку напівпровідникових елементів мультиметром?
7. Які правила слід дотримуватись при пайці елементів на платі?
8. Як перевірити працездатність модуля після ремонту?
9. Які прилади застосовуються для вимірювання сигналів у цифрових системах?
10. Як оформлюється технічна документація після ремонту електронного пристрою?

## 5.6. Перелік рекомендованої літератури

1. Монтаж та налагоджування електромеханічних пристроїв : навч. посіб. / В. В. Грабко та ін. Вінниця : ВНТУ, 2020. 173 с.
2. Експлуатація та монтаж електрообладнання: методичні вказівки для самостійної роботи з навчальної дисципліни «Експлуатація та монтаж електрообладнання» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Р. В. Телюта, О.А.Козловський, В. В. Зінзура. Кропивницький: ЦНТУ, 2018 200 с.
3. Монтаж і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 14 Електрична інженерія спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка денної та заочної форми навчання / уклад. Ю.В. Грицюк. Луцьк : Луцький НТУ, 2020. 48 с.
4. Циганов О. М., Мардзявко В. А., Руденко А. Ю. Монтаж, наладка і експлуатація електрообладнання : конспект лекцій. Миколаїв, 2022. 160 с.



*Навчально-методичне видання*

*Шрамко Юрій Юрійович*

**МОНТАЖ, НАЛАГОДЖЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ  
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

**методичні вказівки  
до виконання лабораторних робіт з дисципліни**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції