

**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

**ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА МЕРЕЖ:
методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт**

Запоріжжя 2026

УДК 621.316+622+669 (072)

О16

*Рекомендовано Науково-методичною радою
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
(протокол № 6 від «27» березня 2026 р.*

Укладачі

Шрамко Ю.Ю. канд. техн. наук, викладач циклової комісії з гірництва та електроінженерії

Мірошніченко С.О., викладач циклової комісії з гірництва та електроінженерії

О16 ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА МЕРЕЖ :
методичні вказівки до виконання лабораторних робіт / уклад.
Ю. Ю. Шрамко, С.О. Мірошніченко Запоріжжя :
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»,
2026. 35 с.

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Обладнання електричних станцій та мереж» призначені для здобувачів освіти спеціальності «Монтаж, експлуатація та ремонт електромеханічного обладнання та обладнання систем електропостачання у ГМК».

У виданні подано стислий теоретичний матеріал, приклади розрахунково-аналітичних процедур, індивідуальні завдання, порядок виконання та оформлення лабораторних робіт, а також питання для самоконтролю і критерії оцінювання результатів.

Матеріали спрямовані на формування практичних навичок аналізу схем, вибору основного обладнання електроенергетичних об'єктів і обґрунтування технічних рішень з урахуванням вимог надійності та безпеки.

УДК 621.316+622+669 (072)

© ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	4
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ.....	5
1.1. Теоретична частина.....	5
1.2.Порядок виконання роботи.....	6
1.3 Обробка результатів вимірювань.....	9
1.5. Питання для самоперіврки.....	21
1.6 Перелік рекомендованих джерел.....	22
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТІВ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.....	23
2.1. Теоретична частина.....	23
2.2.Порядок виконання роботи.....	27
2.3. Обробка результатів вимірювань.....	28
2.4. Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту.....	31
2.5. Питання для самоперіврки.....	33
2.6 Перелік рекомендованих джерел.....	33

ВСТУП

Лабораторні роботи є невід'ємною складовою вивчення дисципліни «Обладнання електричних станцій та мереж» і спрямовані на закріплення теоретичних положень шляхом виконання розрахунково-аналітичних та (за наявності стендового обладнання) експериментальних досліджень. Методичні вказівки призначені для здобувачів освіти спеціальності «Монтаж, експлуатація та ремонт електромеханічного обладнання та обладнання систем електропостачання у ГМК» та орієнтовані на формування практичних навичок аналізу електричних схем, вибору основного обладнання електроенергетичних об'єктів і обґрунтування технічних рішень з урахуванням вимог надійності та безпеки.

У виданні подано стислий теоретичний матеріал, порядок виконання лабораторних робіт, рекомендації щодо обробки результатів, вимоги до оформлення звіту, питання для самоконтролю та критерії оцінювання. Матеріали структуровано таким чином, щоб забезпечити послідовний перехід від розуміння фізичних процесів та параметрів обладнання до інженерної інтерпретації результатів і формування аргументованих висновків.

Під час виконання лабораторних робіт здобувач освіти має: опрацювати теоретичні відомості за темою; підготувати вихідні дані та виконати передбачені розрахунки/вимірювання; оформити результати у вигляді таблиць і графіків (за потреби); проаналізувати отримані залежності та зробити висновки щодо впливу режимних параметрів на роботу електроенергетичного обладнання. Звіт з лабораторної роботи подається у встановлені терміни та повинен містити всі обов'язкові розділи відповідно до вимог, наведених у методичних вказівках.

Дотримання правил охорони праці та електробезпеки є обов'язковою умовою виконання лабораторних робіт. У разі виконання робіт у розрахунково-теоретичному форматі особлива увага приділяється коректності вихідних даних, обґрунтованості прийнятих припущень, точності розрахунків і логічності інженерних висновків.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПІД НАВАНТАЖЕННЯМ

Мета роботи - дослідити роботу силового трансформатора під навантаженням шляхом експериментального (або розрахункового) визначення залежності вторинної напруги, втрат потужності та коефіцієнта корисної дії від струму навантаження і коефіцієнта потужності, а також оцінити регулювання напруги трансформатора.

1.1. Теоретична частина

Силовий трансформатор — статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення рівня змінної напруги при практично незмінній частоті та передачі електричної енергії між колами через магнітне поле. Робота трансформатора під навантаженням характеризується зміною струмів у обмотках, появою падіння напруги на внутрішніх опорах і, як наслідок, зменшенням вторинної напруги порівняно з режимом холостого ходу.

У режимі навантаження потужність, що віддається споживачу, визначається:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

де U_2 — напруга вторинної обмотки, I_2 — струм навантаження, $\cos \varphi_2$ — коефіцієнт потужності навантаження. Вхідна потужність:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

(або вимірюється безпосередньо ватметром/аналізатором. Різниця між P_1 та P_2 відповідає сумарним втратам потужності трансформатора:

$$\Delta P = P_1 - P_2.$$

Втрати в трансформаторі поділяють на дві основні групи: постійні та змінні. Постійні втрати (переважно втрати у сталі магнітопроводу: гістерезисні та вихрові струми залежать головним чином від прикладеної напруги та частоти і вважаються майже сталими за умови підтримання $U_1 \approx const$). Змінні втрати — це втрати в обмотках (мідні втрати, пропорційні квадрату струму:

$$\Delta P_{Cu} \approx I^2 R,$$

а також додаткові втрати, пов'язані з розсіюванням потоку та вихровими струмами в конструктивних елементах.

Однією з ключових характеристик трансформатора під навантаженням є зміна вторинної напруги. За наявності внутрішніх

активного R_k та індуктивного X_k опорів (еквівалентних параметрів короткого замикання напруга на виході зменшується на величину, що залежить не лише від струму, а й від характеру навантаження:

- за активного навантаження $\cos \varphi \approx 1$ домінує падіння на активному опорі;
- за індуктивного навантаження $\cos \varphi < 1$ істотно зростає реактивна складова падіння напруги.

Практично зміну напруги оцінюють через регулювання напруги (відносне падіння напруги:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100$$

де U_{20} — напруга вторинної обмотки в режимі холостого ходу при $U_1 = \text{const}$, U_2 — напруга під навантаженням, U_{2n} — номінальна вторинна напруга.

Енергетичну ефективність трансформатора характеризує коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100.$$

За малих навантажень ККД знижується через домінування постійних втрат, а зі збільшенням навантаження ККД зростає до максимуму, після чого зменшується через швидке зростання змінних втрат $\sim I^2$.

У межах даної роботи аналіз режиму навантаження зводиться до вимірювання (або розрахунку U_2 , I_2 , P_1 (і за потреби $\cos \varphi$ для кількох ступенів навантаження з подальшим визначенням P_2 , ΔP , ΔU та η , а також побудовою відповідних залежностей).

Перевірка розуміння (одне питання: який із чинників, на вашу думку, сильніше впливає на падіння U_2 — збільшення I_2 чи зменшення $\cos \varphi$?

1.2.Порядок виконання роботи

Виконання лабораторної роботи – можливі два способи виконання лабораторної роботи: експериментальний (на стенді та розрахунково-теоретичний (за заданими даними.

1 Спосіб А — експериментальний (на стенді

1. Ознайомитися з паспортними даними трансформатора: S_n , U_{1n} , U_{2n} , I_{2n} , частота, схема з'єднання.

2. Зібрати схему випробування під навантаженням. Підключити прилади для вимірювання U_1 , I_1 , P_1 , U_2 , I_2 та $\cos \varphi$, якщо є.

3. Встановити $U_1 \approx U_{1n}$ і підтримувати її сталою протягом досліду.

4. Зняти U_{20} у режимі холостого ходу (без навантаження).
5. Змінювати навантаження ступенями (наприклад 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0, I_{2n} . На кожному ступені зафіксувати U_2, I_2, P_1 та $\cos \varphi$.
6. За потреби повторити вимірювання для іншого характеру навантаження (активне / активно-індуктивне).
7. Зняти напругу, оформити таблицю вимірювань. Виконати розрахунки $P_2, \Delta P, \eta, \Delta U\%$, побудувати графіки.

2 Спосіб Б2 — розрахунково-теоретичний (за еквівалентною схемою Вихідні дані (задає викладач або беруться з паспорта/довідкових даних

- Номінальні: S_n, U_{1n}, U_{2n}, f .
- Дослід ХХ: P_0 втрати в сталі, U_{20} вторинна напруга при ХХ за $U_1 = U_{1n}$.
- Дослід КЗ або паспортні: u_k та P_k втрати КЗ при номінальному струмі.
- Режими навантаження: набір точок I_2 наприклад 5 ступенів та значення $\cos \varphi_2$ наприклад 1.0; 0.8; 0.6 індуктивний — за завданням.

Примітка: якщо в завданні задані R_k та X_k безпосередньо — блок їх визначення пропускається.

1. Розрахунок еквівалентних параметрів короткого замикання
 1. Обчислити номінальний струм вторинної обмотки:

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}}$$

для однофазного трансформатора; для трифазного використовують відповідну формулу з $\sqrt{3}$.

2. Активна складова відносної напруги КЗ у %:

$$u_R \% = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100$$

3. Реактивна складова відносної напруги КЗ:

$$u_X \% = \sqrt{(u_k \%)^2 - (u_R \%)^2}.$$

4. Перехід до активного та реактивного опорів, приведених до вторинної сторони:

$$R_k = \frac{u_R \%}{100} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n}}, X_k = \frac{u_X \%}{100} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n}}$$

2. Розрахунок падіння напруги та вторинної напруги під навантаженням

Для кожного заданого режиму точки I_2 та $\cos \varphi_2$:

- Визначити $\sin \varphi_2$:

$$\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}$$

- Обчислити падіння напруги на внутрішньому опорі трансформатора для індуктивного навантаження знак "+":

$$\Delta U \approx I_2(R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2)$$

- Обчислити вторинну напругу під навантаженням:

$$U_2 \approx U_{20} - \Delta U$$

- Розрахувати відносне регулювання напруги:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100$$

3. Розрахунок потужностей, втрат та ККД

Для кожної точки навантаження:

- Корисна потужність на навантаженні:

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

- Змінні втрати в обмотках мідні, з урахуванням того, що P_k відповідає номінальному струму:

$$\Delta P_{Cu} = P_k \frac{I_2^2}{I_{2n}^2}$$

- Постійні втрати в сталі:

$$\Delta P_{Fe} \approx P_0$$

- Сумарні втрати:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_{Cu}$$

- Вхідна потужність:

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

- Коефіцієнт корисної дії:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

4. Оформлення результатів

- Заповнити таблицю розрахунків для всіх режимів: I_2 , $\cos \varphi_2$, ΔU , U_2 , P_2 , ΔP_{Cu} , ΔP , η , $\Delta U\%$.
- Побудувати графіки:
 - $U_2 = f(I_2)$ для кожного $\cos \varphi_2$, якщо їх кілька;
 - $\eta = f(I_2)$;
 - за потреби: $\Delta U\% = f(I_2)$.

Сформулювати висновки щодо впливу струму та $\cos \varphi$ на U_2 , втрати та ККД.

1.3 Обробка результатів вимірювань.

Шаблон таблиць для звіту/ Варіант виконання Б1
(розрахунок за показами приладів

Таблиця 1.1 — Паспортні дані та умови досліджу

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Номінальна потужність	S_n		кВА
Номінальна первинна напруга	U_{1n}		В
Номінальна вторинна напруга	U_{2n}		В
Частота	f		Гц
Напруга вторинної обмотки при ХХ (за $U_1 \approx U_{1n}$)	U_{20}		В
Тип навантаження / режим			

Таблиця 1.2 — Вимірювання (вихідні дані для розрахунку

№ точки	Ступінь навантаження	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	$\cos \varphi_2$
1	0.2						
2	0.4						
3	0.6						
4	0.8						
5	1.0						

Примітка: за відсутності даних I_1 допускається заповнювати лише P_1 (як результат ватметра/аналізатора, якщо цього достатньо для балансу потужностей).

Таблиця 1.3 — Розрахункові результати (для кожної точки

№ точки	$U_2, В$	$I_2, А$	$\cos \varphi_2$	$P_2, Вт$	$\Delta P, Вт$	$\eta, \%$	$\Delta U, В$	$\Delta U\%,$
1								
2								
3								
4								
5								

Формули для заповнення Таблиці 1.3:

- Потужність навантаження:

$$P_2 = U_2, I_2, \cos \varphi_2.$$

- Сумарні втрати (за балансом потужностей:

$$\Delta P = P_1 - P_2$$

- ККД:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

- Абсолютне падіння напруги:

$$\Delta U = U_{20} - U_2$$

- Відносне регулювання напруги: ΔU

$$\Delta U\% = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%$$

Таблиця 1.4 — Узагальнення результатів (підсумкові значення

Показник	Для $0.8I_{2n}$	Для $1.0I_{2n}$	Висновок (коротко)
$U_2, В$			
$\Delta U\%, \%$			
$\Delta P, Вт$			
$\eta, \%$			

Графіки (обов'язково

1. $U_2 = f(I_2)$ — зовнішня характеристика.
2. $\eta = f(I_2)$ — енергетична характеристика.
3. $\Delta U\% = f(I_2)$.

Рекомендовані вимоги до оформлення

- У кожній таблиці вказувати одиниці вимірювання.

- Округлення: U до 0.1 В; потужності до 1 Вт; η до 0.1%.
 - На графіках: назви осей, легенда (за наявності кількох режимів, підпис рисунка).
- Данні віртуальних вимірювань.

Варіант 1

Паспортні/умовні дані: $S_n = 2.0 \text{ кВА}$; $U_{1n} = 220 \text{ В}$; $U_{2n} = 24 \text{ В}$; $U_{20} = 25.2 \text{ В}$; $P_0 = 25 \text{ Вт}$; $P_k = 60 \text{ Вт}$; $u_k = 5.0\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	220	2.32	445.0	25.06	16.67	1.0
2	0.4	220	4.42	865.0	24.91	33.33	1.0
3	0.6	220	6.42	1285.0	24.77	50.00	1.0
4	0.8	220	8.33	1705.0	24.62	66.67	1.0
5	1.0	220	10.17	2125.0	24.48	83.33	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	220	1.88	360.3	24.97	16.67	0.8
2	0.4	220	3.55	694.3	24.74	33.33	0.8
3	0.6	220	5.13	1027.0	24.51	50.00	0.8
4	0.8	220	6.64	1358.2	24.28	66.67	0.8
5	1.0	220	8.08	1688.2	24.05	83.33	0.8

Варіант 2

Паспортні/умовні дані: $S_n = 2.5 \text{ кВА}$; $U_{1n} = 220 \text{ В}$; $U_{2n} = 36 \text{ В}$; $U_{20} = 37.5 \text{ В}$; $P_0 = 32 \text{ Вт}$; $P_k = 85 \text{ Вт}$; $u_k = 5.5\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	220	2.54	486.8	37.33	13.89	1.0
2	0.4	220	4.88	956.8	37.16	27.78	1.0
3	0.6	220	7.11	1426.8	36.98	41.67	1.0
4	0.8	220	9.23	1896.8	36.81	55.56	1.0
5	1.0	220	11.27	2366.8	36.64	69.44	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	220	2.07	397.3	37.24	13.89	0.8
2	0.4	220	4.00	784.3	37.01	27.78	0.8
3	0.6	220	5.86	1170.6	36.79	41.67	0.8
4	0.8	220	7.62	1556.2	36.56	55.56	0.8
5	1.0	220	9.31	1941.1	36.34	69.44	0.8

Варіант 3

Паспортні/умовні дані: $S_n = 3.0$ кВА; $U_{1n} = 220$ В; $U_{2n} = 48$ В; $U_{20} = 50.0$ В; $P_0 = 40$ Вт; $P_k = 120$ Вт; $u_k = 6.0\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	220	2.86	547.2	49.64	12.50	1.0
2	0.4	220	5.53	1087.2	49.28	25.00	1.0
3	0.6	220	8.08	1627.2	48.92	37.50	1.0
4	0.8	220	10.51	2167.2	48.56	50.00	1.0
5	1.0	220	12.86	2707.2	48.20	62.50	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	220	2.31	441.7	49.46	12.50	0.8
2	0.4	220	4.50	872.5	49.01	25.00	0.8
3	0.6	220	6.59	1301.8	48.56	37.50	0.8
4	0.8	220	8.58	1729.6	48.11	50.00	0.8
5	1.0	220	10.48	2155.8	47.66	62.50	0.8

Варіант 4

Паспортні/умовні дані: $S_n = 4.0$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 24$ В; $U_{20} = 25.0$ В; $P_0 = 35$ Вт; $P_k = 95$ Вт; $u_k = 4.5\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.79	312.8	24.84	33.33	1.0
2	0.4	380	1.53	618.6	24.68	66.67	1.0
3	0.6	380	2.24	924.9	24.52	100.00	1.0
4	0.8	380	2.92	1232.1	24.36	133.33	1.0
5	1.0	380	3.57	1540.6	24.20	166.67	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.65	256.1	24.77	33.33	0.8
2	0.4	380	1.26	508.6	24.56	66.67	0.8
3	0.6	380	1.85	759.6	24.35	100.00	0.8
4	0.8	380	2.40	1009.1	24.14	133.33	0.8
5	1.0	380	2.94	1257.2	23.93	166.67	0.8

Варіант 5

Паспортні/умовні дані: $S_n = 5.0$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 36$ В; $U_{20} = 37.2$ В; $P_0 = 55$ Вт; $P_k = 160$ Вт; $u_k = 5.0\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.84	386.0	37.04	27.78	1.0
2	0.4	380	1.64	761.0	36.88	55.56	1.0
3	0.6	380	2.42	1136.0	36.72	83.33	1.0
4	0.8	380	3.15	1511.0	36.56	111.11	1.0
5	1.0	380	3.86	1886.0	36.40	138.89	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.69	316.2	36.95	27.78	0.8
2	0.4	380	1.36	626.7	36.72	55.56	0.8
3	0.6	380	2.00	936.0	36.49	83.33	0.8
4	0.8	380	2.61	1244.0	36.26	111.11	0.8
5	1.0	380	3.19	1550.8	36.03	138.89	0.8

Варіант 6

Паспортні/умовні дані: $S_n = 6.0$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 48$ В; $U_{20} = 49.5$ В; $P_0 = 70$ Вт; $P_k = 220$ Вт; $u_k = 5.5\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.93	428.8	49.23	25.00	1.0
2	0.4	380	1.81	847.6	48.96	50.00	1.0
3	0.6	380	2.66	1266.4	48.69	75.00	1.0
4	0.8	380	3.48	1685.2	48.42	100.00	1.0
5	1.0	380	4.28	2104.0	48.15	125.00	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.76	349.7	49.09	25.00	0.8
2	0.4	380	1.50	693.6	48.76	50.00	0.8
3	0.6	380	2.22	1036.0	48.44	75.00	0.8
4	0.8	380	2.89	1376.5	48.11	100.00	0.8
5	1.0	380	3.54	1714.8	47.79	125.00	0.8

Варіант 7

Паспортні/умовні дані: $S_n = 7.5$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 60$ В; $U_{20} = 61.8$ В; $P_0 = 95$ Вт; $P_k = 320$ Вт; $u_k = 6.0\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.05	482.2	61.49	25.00	1.0
2	0.4	380	2.04	956.2	61.19	50.00	1.0
3	0.6	380	3.01	1430.2	60.88	75.00	1.0
4	0.8	380	3.95	1904.2	60.58	100.00	1.0
5	1.0	380	4.87	2378.2	60.27	125.00	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	0.86	395.7	61.32	25.00	0.8
2	0.4	380	1.70	785.4	60.93	50.00	0.8
3	0.6	380	2.50	1173.1	60.54	75.00	0.8
4	0.8	380	3.27	1558.8	60.15	100.00	0.8
5	1.0	380	4.01	1942.5	59.76	125.00	0.8

Варіант 8

Паспортні/умовні дані: $S_n = 10.0$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 110$ В; $U_{20} = 114.0$ В; $P_0 = 140$ Вт; $P_k = 520$ Вт; $u_k = 6.5\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.29	590.0	113.61	18.18	1.0
2	0.4	380	2.52	1172.0	113.22	36.36	1.0
3	0.6	380	3.73	1754.0	112.83	54.55	1.0
4	0.8	380	4.91	2336.0	112.44	72.73	1.0
5	1.0	380	6.06	2918.0	112.05	90.91	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.06	484.1	113.39	18.18	0.8
2	0.4	380	2.11	962.2	112.87	36.36	0.8
3	0.6	380	3.13	1438.6	112.35	54.55	0.8
4	0.8	380	4.11	1913.3	111.83	72.73	0.8
5	1.0	380	5.06	2386.2	111.31	90.91	0.8

Варіант 9

Паспортні/умовні дані: $S_n = 12.5$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 127$ В; $U_{20} = 131.0$ В; $P_0 = 170$ Вт; $P_k = 640$ Вт; $u_k = 5.5\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.41	644.7	130.55	19.69	1.0
2	0.4	380	2.75	1281.4	130.10	39.37	1.0
3	0.6	380	4.08	1918.1	129.65	59.06	1.0
4	0.8	380	5.39	2554.8	129.20	78.74	1.0
5	1.0	380	6.67	3191.5	128.75	98.43	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.16	528.4	130.30	19.69	0.8
2	0.4	380	2.30	1050.3	129.70	39.37	0.8
3	0.6	380	3.40	1570.0	129.11	59.06	0.8
4	0.8	380	4.47	2087.6	128.52	78.74	0.8
5	1.0	380	5.50	2603.1	127.92	98.43	0.8

Варіант 10

Паспортні/умовні дані: $S_n = 16.0$ кВА; $U_{1n} = 380$ В; $U_{2n} = 220$ В; $U_{20} = 227.0$ В; $P_0 = 230$ Вт; $P_k = 980$ Вт; $u_k = 6.0\%$.

Таблиця 1.2а — режим $\cos \varphi_2 = 1.0$

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.67	762.1	226.27	14.55	1.0
2	0.4	380	3.27	1511.4	225.53	29.09	1.0
3	0.6	380	4.85	2260.6	224.80	43.64	1.0
4	0.8	380	6.40	3009.8	224.06	58.18	1.0
5	1.0	380	7.92	3759.0	223.33	72.73	1.0

Таблиця 1.2б — режим $\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивний

№	Ступінь	U1, В	I1, А	P1, Вт	U2, В	I2, А	cosφ2
1	0.2	380	1.37	624.7	225.82	14.55	0.8
2	0.4	380	2.71	1244.1	224.76	29.09	0.8
3	0.6	380	4.03	1861.0	223.69	43.64	0.8
4	0.8	380	5.31	2475.2	222.63	58.18	0.8
5	1.0	380	6.55	3086.9	221.56	72.73	0.8

Для виконання роботи (Б2)
Загальні умови для всіх варіантів

- Тип навантаження: активне $\cos \varphi = 1.0$ та активно-індуктивне $\cos \varphi = 0.8$, індуктивний характер.
- Ступені навантаження:
$$I_2 = (0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0) \cdot I_{2n}.$$
- Вважати, що U_{20} відповідає режиму ХХ при $U_1 \approx U_{1n}$.
- Для індуктивного навантаження використовувати:
$$\Delta U \approx I_2(R_k \cos \varphi + X_k \sin \varphi).$$

Таблиця 1.1 — Варіанти вихідних даних (10 варіантів)

Варіант	S_n , кВА	U_{2n} , В	U_{20} , В	u_k , %	P_k , Вт	P_0 , Вт
1	2.0	24	25.2	5.0	60	25
2	2.5	36	37.5	5.5	85	32
3	3.0	48	50.0	6.0	120	40
4	4.0	24	25.0	4.5	95	35
5	5.0	36	37.2	5.0	160	55
6	6.0	48	49.5	5.5	220	70
7	7.5	60	61.8	6.0	320	95
8	10.0	110	114.0	6.5	520	140
9	12.5	127	131.0	5.5	640	170
10	16.0	220	227.0	6.0	980	230

Завдання до кожного варіанта (виконати повністю)

1. Розрахувати $I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}}$.
2. Визначити u_R %, u_X %, а далі R_k та X_k (приведені до вторинної сторони).
3. Для двох режимів $\cos \varphi = 1.0$ та $\cos \varphi = 0.8$ (індуктивний):
 - для кожного ступеня I_2 розрахувати ΔU , U_2 , ΔU ;
 - обчислити P_2 , ΔP_{Cu} , ΔP , P_1 , η .
4. Побудувати графіки:
 - $U_2 = f(I_2)$ (дві криві для двох $\cos \varphi$;
 - $\eta = f(I_2)$ (дві криві).
5. Зробити висновки (3–5 речень: вплив I_2 та $\cos \varphi$ на U_2 , ΔU і η .

Примітки.

У таблицях результати U_2 округляти до 0.1 В, потужності — до 1 Вт, η — до 0.1%.

- Якщо при розрахунку вийде $u_R\% > u_k\%$ (через округлення, прийняти $u_X\% = 0$ і коротко зазначити це у висновках.

Шаблон таблиць для звіту. Варіант виконання Б2

Таблиця 1.2 — Вихідні дані трансформатора та дослідів ХХ/КЗ

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Номінальна потужність	S_n		В·А / кВ·А
Номінальна вторинна напруга	U_{2n}		В
Напруга вторинної обмотки при ХХ	U_{20}		В
Напруга КЗ (відносна)	u_k		%
Втрати КЗ при ($I_{\{n\}}$)	P_k		Вт
Втрати ХХ (у сталі)	P_0		Вт
Частота	f		Гц

Таблиця 1.3 — Розрахунок номінального струму та параметрів КЗ (приведено до вторинної сторони)

Розрахункова величина	Формула	Значення	Одиниці
Номінальний струм вторинної обмотки	$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}}$		А
Активна складова u_R	$u_R \% = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100$		%
Реактивна складова u_X	$u_X \% = \sqrt{(u_k \%)^2 - (u_R \%)^2}$		%
Активний опір КЗ	$R_k = \frac{u_R \%}{100} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n}}$		Ом
Реактивний опір КЗ	$X_k = \frac{u_X \%}{100} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n}}$		Ом

Таблиця 1.4 — Завдання режимів навантаження (5 ступенів)

№ точки	Частка навантаження	I_2	$\cos \varphi_2$	$\sin \varphi_2$
1	$0.2I_{2n}$			
2	$0.4I_{2n}$			
3	$0.6I_{2n}$			
4	$0.8I_{2n}$			
5	$1.0I_{2n}$			

Примітка: $\sin \varphi_2 = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}$.

Таблиця 1.5 — Основні розрахунки режиму (Б2: напруга, потужність, втрати, ККД)

№ точки	I_2	ΔU	U_2	$\Delta U \%$	P_2	ΔP_{Cu}	ΔP	P_1	η
1									
2									
3									
4									
5									

(окрема таблиця для кожного значення $\cos \varphi_2$, якщо їх декілька)

Розрахункові формули для заповнення табл. 1.5:

$\Delta U \approx I_2 (R_k \cos \varphi_2 + X_k \sin \varphi_2)$ (індуктивне навантаження)

$$U_2 \approx U_{20} - \Delta U$$

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$$

$$\Delta P_{Cu} = P_k \left(\frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2$$

$$\Delta P = P_0 + \Delta P_{Cu}$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100$$

Таблиця 1.6 — Підсумкові показники (для порівняння режимів $\cos \varphi$)

$\cos \varphi_2$	U_2 при $I_2 = I_{2n}$	$\Delta U\%$ при $I_2 = I_{2n}$	η при $I_2 = I_{2n}$	Примітка

Графік $U_2 = f(I_2)$ (окремі криві для різних $\cos \varphi_2$.

Графік $\eta = f(I_2)$ (окремі криві для різних $\cos \varphi_2$.

За потреби: $\Delta U\% = f(I_2)$.

Приклад розрахунку для варіанта 1

Дано: $S_n = 2.0 \text{ kVA} = 2000 \text{ VA}$; $U_{2n} = 24 \text{ V}$; $U_{20} = 25.2 \text{ V}$; $u_k = 5.0\%$;

$P_k = 60 \text{ W}$; $P_0 = 25 \text{ W}$.

Режими навантаження: $I_2 = (0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1.0), I_{2n}$.

Два випадки: $\cos \varphi_2 = 1.0$ та $\cos \varphi_2 = 0.8$ (індуктивний, $\sin \varphi_2 = 0.6$).

1 Номінальний струм вторинної обмотки

$$I_{2n} = \frac{S_n}{U_{2n}} = \frac{2000}{24} = 83.33 \text{ A}$$

Отже, струми для 5 ступенів:

- $0.2 I_{2n} = 16.67 \text{ A}$
- $0.4 I_{2n} = 33.33 \text{ A}$
- $0.6 I_{2n} = 50.00 \text{ A}$
- $0.8 I_{2n} = 66.67 \text{ A}$
- $1.0 I_{2n} = 83.33 \text{ A}$

2 Параметри короткого замикання (приведено до вторинної сторони)

1. Активна складова:

$$u_R\% = \frac{P_k}{S_n} \cdot 100 = \frac{60}{2000} \cdot 100 = 3.0\%$$

2. Реактивна складова:

$$u_X \% = \sqrt{u_k^2 - u_R^2} = \sqrt{5^2 - 3^2} = \sqrt{16} = 4.0\%$$

3. Базовий опір:

$$\frac{U_{2n}}{I_{2n}} = \frac{24}{83.33} = 0.288$$

4. Опори:

$$R_k = \frac{u_R}{100} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = 0.03 \cdot 0.288 = 0.00864 \text{ Ом.}$$

$$X_k = \frac{u_X}{100} \cdot \frac{U_{2n}}{I_{2n}} = 0.04 \cdot 0.288 = 0.01152 \text{ Ом}$$

3 Розрахунки для ($\cos \varphi_2 = 1.0$ активне навантаження)

Для $\cos \varphi = 1 \Rightarrow \sin \varphi = 0$:

$$\Delta U \approx I_2 \cdot (R_k \cos \varphi + X_k \sin \varphi) = I_2 \cdot R_k$$

$$U_2 \approx U_{20} - \Delta U, \quad \Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{2n}} \cdot 100$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi, \quad \Delta P_{Cu} = P_k \left(\frac{I_2}{I_{2n}} \right)^2, \quad \Delta P = P_0 + \Delta P_{Cu},$$

$$P_1 = P_2 + \Delta P, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Таблиця 1. (округлення: U_2 до 0.1 В; потужності до 1 Вт; η до 0.1%)

№	I_2, A	$\Delta U, V$	U_2, V	ΔU	P_2, W	$\Delta P_{Cu}, W$	$\Delta P, W$	P_1, W	$\eta,$
1	16.67	0.144	25.1	0.6	418	2.4	27.4	445	93.8
2	33.33	0.288	24.9	1.2	830	9.6	34.6	865	96.0
3	50.00	0.432	24.8	1.8	1238	21.6	46.6	1285	96.4
4	66.67	0.576	24.6	2.4	1642	38.4	63.4	1705	96.3
5	83.33	0.720	24.5	3.0	2040	60.0	85.0	2125	96.0

4 Розрахунки для ($\cos \varphi_2 = 0.8$ індуктивне навантаження)

$$\cos \varphi = 0.8, \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - 0.8^2} = 0.6$$

$$\Delta U \approx I_2 \cdot (R_k \cdot 0.8 + X_k \cdot 0.6)$$

Чисельно:

$$R_k \cdot 0.8 = 0.00864 \cdot 0.8 = 0.006912,$$

$$X_k \cdot 0.6 = 0.01152 \cdot 0.6 = 0.006912$$

$$\Rightarrow \Delta U \approx I_2 \cdot 0.013824$$

Далі:

$$U_2 \approx U_{20} - \Delta U,$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cdot 0.8$$

Втрати $\Delta P_{Cu}, \Delta P, P_1$, — як у п.3.

Таблиця 2.

№	I_2, A	$\Delta U, V$	U_2, V	$\Delta U, \%$	P_2, W	$\Delta P_{Cu}, W$	$\Delta P, W$	P_1, W	$\eta, \%$
1	16.67	0.230	25.0	1.0	333	2.4	27.4	360	92.4
2	33.33	0.461	24.7	1.9	660	9.6	34.6	694	95.0
3	50.00	0.691	24.5	2.9	980	21.6	46.6	1027	95.5
4	66.67	0.922	24.3	3.8	1295	38.4	63.4	1358	95.3
5	83.33	1.152	24.0	4.8	1603	60.0	85.0	1688	95.0

5 Короткі висновки прикладу

1. Зі зростанням струму навантаження I_2 вторинна напруга U_2 зменшується через падіння напруги на внутрішніх опорах R_k та X_k .

2. Для індуктивного навантаження $\cos \varphi = 0.8$ падіння напруги істотно більше: при $I_2 = I_{2n}$ ΔU проти 3.0% для $\cos \varphi = 1.0$.

3. ККД зростає з навантаженням до високих значень (понад 95%, а при малих навантаженнях знижується через помітний вплив сталих втрат P_0).

1.4. Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту.

Звіт повинен містити.

1. Титульна сторінка
2. Мета роботи.
3. Короткі теоретичні відомості (основні поняття, формули для P_2 , ΔU , ΔP , η).
4. Порядок виконання роботи.
5. Вихідні дані.
6. Таблиці результатів:
 - таблиця(і вихідних вимірювань/даних;
 - таблиця розрахунків (P_2 , ΔP , η , ΔU , ΔU тощо).
7. Приклад розрахунків (для 1 точки/режиму або для одного ступеня навантаження — з підстановкою чисел.
8. Графіки: $U_2 = f(I_2)$, $\eta = f(I_2)$ (за потреби ΔU ; з підписами осей та легендою).
9. Аналіз результатів (2–5 речень по графіках і таблицях).
10. Висновки (3–5 речень за метою роботи).
11. Список використаних джерел.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *.docx або *.pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт максимум 10 балів:

- *81-100 % від макс. балів* - 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

- *61-80 % від макс. балів* - 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.

- *41-60 % від макс. балів* - 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.

- *21-40 % від макс. балів* - 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.

- *1-20% від макс. балів* - неповністю 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 не задовольняють для переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які не зміг виправити.

1.5. Питання для самоперевірки

1. Яке призначення силового трансформатора та які його основні номінальні параметри?

2. Чим відрізняються режими холостого ходу та навантаження трансформатора?
3. Які види втрат потужності існують у трансформаторі (у сталі та в обмотках і від чого вони залежать)?
4. Чому втрати в сталі вважають майже сталими за умови $U_1 = \text{const}$?
5. Як визначають корисну потужність на вторинній стороні P_2 ? Наведіть формулу.
6. Як за балансом потужностей визначити сумарні втрати ΔP_u трансформаторі?
7. Як визначити коефіцієнт корисної дії трансформатора η та що він показує?
8. Що таке регулювання (падіння напруги трансформатора ΔU_i як його обчислюють)?
9. Чому при індуктивному навантаженні ($\cos \varphi < 1$ вторинна напруга знижується сильніше, ніж при активному)?
10. Який фізичний зміст параметрів R_k та X_k (еквівалентних опорів короткого замикання)?
11. Як за даними досліду КЗ (або паспортними u_k , P_k визначити активну та реактивну складові u_R і u_X ?
12. Чому мідні втрати ΔP_{Cu} змінюються приблизно пропорційно I^2 ?
13. За яких умов ККД трансформатора наближається до максимального (яке співвідношення постійних і змінних втрат)?
14. Які графіки є основними для аналізу роботи трансформатора під навантаженням та що з них визначають?
15. Які типові причини похибок (для експериментального способу можуть впливати на значення U_2 , P_1 та η ?

1.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Немировський А. Є. Електрообладнання електричних мереж, станцій і підстанцій. Інфра-Інженерія, 2020. 174 с.
2. Бахор З. М., Яцейко А. Я. Проектування підстанцій електричних мереж. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2023. 304 с.
3. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій : навч. посібник для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: О. В. Остапчук, П. Л. Денисюк, Ю. П. Матеєнко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 183 с.
4. Омельчук, А. О. Електрична частина станцій і підстанцій : навч. посіб. Київ : ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 479 с.
5. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович та ін. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2019. 272 с.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ І ХАРАКТЕРИСТИК АПАРАТІВ ЗАХИСТУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Мета роботи – дослідити основні параметри та час-струмові характеристики апаратів захисту електричних мереж (автоматичних вимикачів, плавких запобіжників, ПЗВ/дифавтоматів, навчитися визначати їх за паспортними даними та виконувати обґрунтований вибір апаратів для заданої ділянки мережі з перевіркою відключної здатності й селективності.

2.1. Теоретична частина

Призначення апаратів захисту електричних мереж

Апаратами захисту називають електротехнічні пристрої, призначені для автоматичного вимкнення пошкодженої або аварійно перевантаженої ділянки мережі з метою запобігання термічним і електродинамічним пошкодженням провідників та обладнання, зниження пожежної небезпеки й підвищення електробезпеки. Основними аварійними режимами, від яких здійснюється захист, є перевантаження, короткі замикання, струми витоку на землю (диференційний струм та перенапруги).

Класифікація та функції апаратів захисту захисту в мережах низької напруги:

- плавкі запобіжники – забезпечують відключення кола при струмах КЗ та частково при тривалих перевантаженнях;
- автоматичні вимикачі – багаторазовий захист від перевантажень і коротких замикань, поєднують комутаційну та захисну функції;
- пристрої захисного вимкнення (ПЗВ / дифавтомати – захист від ураження електричним струмом і/або пожежний захист за рахунок контролю струму витоку;
- теплові реле – переважно захист електродвигунів від перевантаження;
- обмежувачі перенапруг (УЗІП/ОПН – захист ізоляції обладнання від імпульсних перенапруг (грозових і комутаційних).

Основні паспортні параметри апаратів захисту

Для автоматичних вимикачів (АВ):

- U_n – номінальна напруга;
- I_n – номінальний струм;
- характеристика миттєвого розчіплення (для модульних АВ:
 - В: спрацювання електромагнітного розчіплювача приблизно при $3-5 \cdot I_n$;
 - С: приблизно при $5-10 \cdot I_n$;
 - D: приблизно при $10-20 \cdot I_n$;

- I_{cn} (I_{cu} – номінальна (гранична відключна здатність, кА);
- кількість полюсів (1P, 2P, 3P, 4P, спосіб встановлення, робочі умови).

Для плавких запобіжників:

- U_n – номінальна напруга;
- I_n – номінальний струм плавкої вставки;
- тип характеристики (наприклад, gG/gL – загального призначення; aM – для двигунів);
- I^2t – енергія пропускання (важлива для термічної стійкості кабелів та захисту напівпровідників).

Для ПЗВ/дифавтоматів:

- I_n – номінальний струм через контакти;
- $I_{\Delta n}$ – номінальний диференційний струм (30 мА – захист людини; 100–300 мА – пожежний захист);
- тип чутливості (АС, А тощо);
- час спрацювання (звичайний або селективний тип S).

Час-струмові характеристики та принцип дії

Захисна дія апаратів оцінюється їх час-струмовими характеристиками ($t=f(I)$, які показують залежність часу відключення від величини струму).

- При перевантаженні спрацювання має *витримку часу* (чим більший струм, тим менший час відключення).
- При короткому замиканні спрацювання має *миттєвий* або *короткочасний* характер.

Для автоматичних вимикачів ці режими реалізуються двома розчіплювачами:

- тепловим (біметалевим – реагує на нагрів при перевантаженні);
- електромагнітним – реагує на різке зростання струму при КЗ.

Основні розрахункові співвідношення для вибору захисту

Робочий струм 3-фазного кола:

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

де P – активна потужність, U – лінійна напруга, $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності.

Перевірка відключної здатності:

$$I_{cn}, (I_{cu}) \geq I_k$$

де I_k – очікуваний струм короткого замикання в точці встановлення апарата.

Умова коректного вибору номіналу (загальна:

$$I_n \geq I_p$$

(з урахуванням умов прокладання, температурних поправок і можливих пускових струмів для двигунів.

Селективність (координація захистів

Селективність – це властивість системи захисту, за якої при аварії відключається лише найближчий до місця пошкодження апарат, а апарати вищого рівня залишаються ввімкненими. Перевірка селективності виконується шляхом порівняння час-струмових характеристик апаратів або за таблицями селективності виробника.

Захист у мережах високої напруги (ВН

Захист у мережах ВН — це сукупність технічних засобів і алгоритмів, які виявляють аварійні та ненормальні режими і забезпечують швидке селективне відключення пошкодженої ділянки або обмеження розвитку аварії при збереженні стійкості енергосистеми.

Від чого захищають мережі ВН

Основні небезпечні режими:

- Короткі замикання: однофазні на землю, двофазні, трифазні, міжфазні з землею.
- Перевантаження (рідше як аварійна подія у ВН, але актуально для трансформаторів/ліній.
- Перенапруги: грозові та комутаційні.
- Порушення стійкості та синхронізму (для міжсистемних зв'язків.
- Ненормальні режими: замикання на землю в мережах з ізольованою/компенсованою нейтраллю, обрив фази, асиметрія, коливання напруги/частоти.

Чим реалізується захист (типова структура

1. Вимірювальні перетворювачі:
 - трансформатори струму (ТС і напруги (ТН; інколи — комбіновані, оптичні датчики.
2. Пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА):
 - сучасні цифрові термінали (мікропроцесорні, що виконують захист, автоматику, реєстрацію аварій.
3. Комутаційні апарати:
 - вимикачі ВН (SF_6 , вакуумні для середніх напруг, елегазові/повітряні/масляні історично, роз'єднувачі, заземлювачі.
4. Канали зв'язку/телемеханіка (за потреби):
 - для дистанційних/лінійних диференційних захистів, прискорення відключення, АПВ/АПВВ.

5. Засоби обмеження перенапруг:
- ОПН (ZnO, грозозахисні троси, заземлення, координація ізоляції.

Основні принципи: швидкість, селективність, резервування

- Селективність: відключається лише пошкоджений елемент (лінія, трансформатор, секція шин).
- Швидкодія: мінімізація термічного/електродинамічного впливу струмів КЗ і збереження стійкості системи.
- Резервування:
 - основний захист (працює першим);
 - резервний (спрацьовує при відмові основного або вимикача, часто з витримкою часу та/або по іншому принципу.

Типові види релейного захисту в мережах ВН

Захист ліній електропередачі (ЛЕП)

- Дистанційний (імпедансний захист — основний для ВН/НВН; має зони дії (1-а — найшвидша, 2-а/3-я — резервні).
- Струмівий максимальний (МТЗ — як резервний або для мереж середньої напруги/радіальних схем).
- Диференційний лінійний — дуже швидкий і селективний, потребує каналу зв'язку між кінцями лінії.
- Захист від замикань на землю:
 - за нульовою послідовністю ($3I_0$, $3U_0$, напрямлений/ненаправлений — залежно від режиму нейтралі).
- АПВ (автоматичне повторне вмикання — критично важливе на ПЛ: більшість пошкоджень короткочасні (грозові переkritтя тощо).

Захист силових трансформаторів

- Диференційний захист трансформатора — основний (внутрішні пошкодження).
- Газовий захист (Бухгольц — для маслонаповнених трансформаторів (внутрішні дефекти, виділення газу).
- Максимальний струмівий/земляний — резерв.
- Тепловий, перевантаження, контроль температури обмоток/масла — для захисту від перегріву.
- Захист від перенапруг (ОПН на вводах, контроль РПН (за наявності).

4.3. Захист шин (РУ/ПС

- Диференційний захист шин — дуже швидкий; потрібна якісна схема ТС та логіка зонування.
- Резервування від суміжних приєднань (МТЗ/дистанційний з витримкою).

Захист генераторів, двигунів ВН, батарей конденсаторів/реакторів

- Генератор: диференційний статора, замикання на землю, від втрати збудження, від асинхронного режиму, від перенавантаження, частотний.
- БК/реактори: струмовий, диференційний, перенапруги, дисбаланс, гармоніки — залежно від схеми.

Захист від перенапруг у ВН

- ОПН (металооксидні обмежувачі перенапруг на підстанціях і вводах обладнання.
- Грозозахисні троси, екранування ПЛ.
- Заземлення опор і підстанцій (забезпечення допустимих напруг кроку/дотику.
- Координація ізоляції: узгодження рівнів ізоляції обладнання з очікуваними перенапругами та характеристиками ОПН.

Практичні критерії “правильного” захисту ВН

- Чутливість (виявляє найменші аварійні струми у кінці зони.
- Стійкість до неаварійних режимів (пускові/перехідні, перенавантаження, колювання потужності, насичення ТС.
- Селективність та координування між приєднаннями і рівнями напруг.
- Надійність вимірювальних кіл (ТС/ТН, вторинні кола, дублювання живлення РЗА.
- Перевірка та випробування: налаштування, вторинні ін'єкції, аналіз осцилограм, перевірка АПВ/АВР.

2.2.Порядок виконання роботи

1. Ознайомлення з вихідними даними варіанта.

Визначити: рівень напруги мережі (кВ, тип об'єкта (лінія/трансформатор/шини/електродвигун, схему мережі (радіальна, кільцева, режим нейтралі (ізолювана, заземлена, компенсована, а також задані параметри навантаження та очікувані струми короткого замикання (за умовою варіанта або прийняті типово.

2. Визначення нормального режиму роботи.

Розрахувати (або прийняти робочі струми елемента мережі та оцінити допустимі перевантаження (за потреби. Для ліній і трансформаторів вказати номінальні параметри: U_n, S_n, P, I_n .

3. Аналіз можливих аварійних режимів.

Для об'єкта варіанта перелічити найбільш імовірні пошкодження:

- однофазне КЗ на землю;
- міжфазні КЗ;
- трифазне КЗ;
- перевантаження (для трансформаторів/ліній;

- перенапруги (грозові/комутаційні).

Вказати, які з цих режимів мають бути відсічені захистом.

4. Вибір принципу захисту (основний і резервний).

Обґрунтувати вибір типових захистів для об'єкта, наприклад:

- для ЛЕП ВН: дистанційний (основний, МТЗ/напрявлений земляний (резервний, АПВ);
- для трансформатора: диференційний + газовий (основні, МТЗ/земляний (резервні);
- для шин: диференційний шин (основний, резервування від приєднань.

Зафіксувати склад функцій РЗА.

5. Вибір комутаційного апарата для відключення (вимикача).

За прийнятим рівнем напруги обрати тип вимикача (вакуумний/елегазовий тощо та перевірити ключові параметри:

- номінальна напруга U_n ;
- номінальний струм I_n ;
- відключна здатність $I_{откл}$ (або I_{sc} не менша за очікуваний струм КЗ у точці встановлення.

6. Розрахункова перевірка спрацювання захистів (спрощено).

Виконати перевірку умов:

- чутливості (захист має "бачити" аварію в своїй зоні);
- селективності (узгодити витримки часу/зони з суміжними захистами;
- швидкодії (для основного захисту — мінімальні витримки.

За наявності даних — побудувати/проаналізувати узагальнені часові залежності спрацювання (або зонність для дистанційного захисту.

7. Оцінка автоматики та протиаварійних функцій (за потреби).

Вказати доцільність застосування: АПВ, АВР, частотного розвантаження, контролю напруги/частоти, синхронізму (для відповідних об'єктів.

8. Оформлення результатів у звіті.

Подати: вихідні дані, прийняту схему захисту (структурно/таблично, перелік обраних пристроїв і параметрів, розрахункові перевірки (відключна здатність, селективність/витримки, висновки щодо правильності вибору та забезпечення надійності й безпеки.

2.3. Обробка результатів вимірювань

Таблиця 2.1 – Завдання.

Варіант	Склад навантажень (кожен рядок — окреме навантаження)	Довжина лінії L, м	Кабель	I_k , кА	Додаткова вимога
1	1. Освітлення LED $P = 2,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Розеткизмш. $P = 5,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,90$ 3. Нагрівачі $P = 4,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$ 4. Двигунвентилятора $P = 3,0$ кВт,	45	Cu 4×6 мм ²	3,0	ПЗВ 30 мА

Варіант	Склад навантажень (кожен рядок — окреме навантаження)	Довжина лінії L, м	Кабель	I_k , кА	Додаткова вимога
	$\cos \varphi = 0,82, \eta = 0,88, k_{\text{пуск}} = 6, t_{\text{пуск}} = 3c$				
2	1. Освітлення $P = 1,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Розетки $P = 6,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,90$ 3. Компресор двигун $P = 5,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,86, \eta = 0,90, k_{\text{пуск}} = 7, t_{\text{пуск}} = 4c$ 4. Нагрівачі $P = 3,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$	35	Cu 4×6 мм ²	3,5	Характеристика АВ: С або D обґрунтувати
3	1. Освітлення $P = 2,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Нагрівачі $P = 6,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$ 3. Зварювальний пост умовнозміш. $P = 7,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,85$ 4. Двигуннасоса $P = 4,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,83, \eta = 0,89, k_{\text{пуск}} = 6, t_{\text{пуск}} = 5c$	60	Al 4×16 мм ²	5,0	ПЗВ 100 мА пожежне
4	1. Освітлення $P = 1,8$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Розетки $P = 4,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,90$ 3. Двигун вентиляції і $P = 7,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,80, \eta = 0,90, k_{\text{пуск}} = 7, t_{\text{пуск}} = 4c$ 4. Нагрівачі $P = 2,5$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$	40	Cu 4×10 мм ²	4,5	Забезпечити селективність з ввідним АВ 63 А
5	1. Освітлення $P = 3,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Розетки $P = 8,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,90$ 3. Нагрівачі $P = 5,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$ 4. Двигун конвеєра $P = 5,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,84, \eta = 0,90, k_{\text{пуск}} = 6, t_{\text{пуск}} = 3c$	70	Al 4×25 мм ²	6,0	ПЗВ 30 мА + УЗІП обґрунтувати місце
6	1. Освітлення $P = 2,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Змішане навантаження майстерні $P = 10,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,85$ 3. Двигун насоса $P = 11,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,83, \eta = 0,91, k_{\text{пуск}} = 6, t_{\text{пуск}} = 5c$ 4. Нагрівачі $P = 3,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$	55	Cu 4×16 мм ²	7,0	Характеристика АВ: D перевірити пуск
7	1. Освітлення $P = 1,2$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Розетки $P = 5,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,90$ 3. Серверне обладнання $P = 3,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,98$ 4. Кондиціонер двигун $P = 3,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,85, \eta = 0,88, k_{\text{пуск}} = 5, t_{\text{пуск}} = 2c$	30	Cu 4×6 мм ²	3,0	ПЗВ 30 мА тип А
8	1. Освітлення $P = 2,2$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Нагрівачі $P = 7,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$ 3. Двигун компресора $P = 15,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,86, \eta = 0,92, k_{\text{пуск}} = 8, t_{\text{пуск}} = 3c$ 4. Змішане навантаження $P = 5,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,85$	50	Al 4×35 мм ²	8,0	Перевірити селективність з ввідним АВ 100 А
9	1. Освітлення $P = 1,6$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Розетки $P = 6,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,90$ 3. Підймальний механізм двигун $P = 7,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,82, \eta = 0,90, k_{\text{пуск}} = 7, t_{\text{пуск}} = 4c$ 4. Нагрівачі $P = 4,0$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$	65	Al 4×25 мм ²	6,5	ПЗВ 100 мА пожежне
10	1. Освітлення $P = 2,8$ кВт, $\cos \varphi = 0,95$ 2. Зварювальна дільниця умовнозміш. $P = 9,0$ кВт, $\cos \varphi = 0,85$ 3. Двигун вентилятора $P = 5,5$ кВт, $\cos \varphi = 0,84, \eta = 0,90, k_{\text{пуск}} = 6, t_{\text{пуск}} = 3c$ 4. Нагрівачі $P = 3,5$ кВт, $\cos \varphi = 1,0$	80	Al 4×25 мм ²	5,5	ПЗВ 30 мА + УЗІП

Обробка результатів .

1. Підготовка вихідних і розрахункових даних

- Занести у таблицю всі навантаження варіанта (тип, P , $\cos \varphi$, η , пускові дані).

- Для кожного навантаження розрахувати робочий струм:
- для 1-фазного кола (за потреби):

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi}$$

- для 3-фазного кола:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

- Визначити сумарну потужність і сумарний розрахунковий струм групи (за прийнятим підходом у роботі):

- або за сумою струмів гілок;
- або за сумарною потужністю з прийнятим $\cos \varphi$.

2. Аналіз «умов спрацювання» захисту

- Порівняти отриманий I_p із номіналом апарата:

$$I_n \geq I_p$$

- Для двигунів додатково перевірити пуск:

$$I_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_p$$

та обґрунтувати вибір характеристики (В/С/D або налаштування розчіплювачів) так, щоб не було помилкового відключення під час пуску при $t_{\text{пуск}}$.

3. Перевірка відключної здатності

- Зіставити очікуваний струм КЗ у точці встановлення I_k із відключною здатністю апарата:

$$I_{cn}(I_{cu}) \geq I_k$$

- У висновку зазначити запас за відключною здатністю (достатній/недостатній).

4. Перевірка селективності (узгодження захистів)

- Прийняти (або за умовою варіанта) ввідний апарат і апарат відгалуження.

- Порівняти їх узагальнені час-струмові характеристики (або зони/витримки часу), сформулювати висновок:
 - «селективність забезпечена» / «часткова селективність» / «не забезпечена».
 - Якщо селективність не забезпечена — запропонувати корекцію: зміна номіналів, типу характеристики, витримок часу, перехід на селективний апарат тощо.
5. Обробка даних для ПЗВ/дифавтомата (за умовою)
- Вибрати $I_{\Delta n}$ за призначенням:
 - 30 мА — захист людини;
 - 100–300 мА — пожежний захист.
 - Перевірити відповідність I_n ПЗВ розрахунковому струму кола (не менше I_p).
 - У висновку зазначити доцільність типу (АС/А, селективний S — якщо потрібно).
6. Узагальнення результатів та висновки
- Оформити підсумкову таблицю «Навантаження → розрахунковий струм → обраний апарат → перевірки (I_{cn} , селективність, пуск)».
 - Сформулювати 3–6 висновків: правильність вибору, відповідність вимогам безпеки та надійності, наявні обмеження.

Таблиця 2.2 – Шаблон таблиці для звіту.

№	Вид навантаження	P, кВт	$\cos\varphi$	η	$k_{\text{пуск}}$	$t_{\text{пуск}}, \text{с}$	$I_p, \text{А}$	Обраний апарат (тип)	$I_n, \text{А}$	X-ка (B/C/D)	$I_{cn}/I_{cu}, \text{кА}$	Перевірка ($I_n \geq I_p$; $I_{cn} \geq I_k$; пуск)
---	------------------	--------	---------------	--------	-------------------	-----------------------------	-----------------	----------------------	-----------------	--------------	----------------------------	--

Обробка результатів вимірювань (розрахункових даних) Для кожного навантаження варіанта розрахувати I_p (за відповідною формулою 1ф/3ф).

1. Визначити сумарний струм групи та обрати номінал апарата захисту I_n з умовою $I_n \geq I_p$.
2. Для двигуна перевірити пуск: $I_{\text{пуск}} = k_{\text{пуск}} \cdot I_p$ і обґрунтувати вибір характеристики (C/D).
3. Перевірити відключну здатність: $I_{cn}(I_{cu}) \geq I_k$.
4. За додатковими вимогами: вибрати ПЗВ ($I_n, I_{\Delta n}$, тип АС/А) та/або обґрунтувати УЗІП.
5. Оформити підсумкову табл. 2.2 «Навантаження → I_p → обраний апарат → перевірки» і зробити висновки.

2.4. Критерії оцінювання та вимоги до оформлення звіту

Звіт повинен містити

1. Титульну сторінку.
2. Мету роботи.

3. Вихідні дані варіанта (перелік навантажень, параметри мережі, L , тип кабелю, I_k , додаткові вимоги).
4. Коротку теоретичну частину (призначення апаратів захисту, основні параметри, час-струмові характеристики, селективність).
5. Розрахункову частину:
 - розрахунок струмів для кожного навантаження та сумарного струму групи;
 - вибір апарата(ів) захисту (тип, U_n , I_n , характеристика В/С/D або інша);
 - перевірка відключної здатності $I_{cn}(I_{cu}) \geq I_k$;
 - (за умовою) перевірка пуску двигуна, селективності, вибір ПЗВ/УЗІП.
6. Таблиці результатів (вихідні дані; розраховані струми; вибір апаратів; перевірки).
7. Висновки (3–6 пунктів).
8. Перелік посилань.

Підготовлена згідно методичних вказівок робота у форматі файлу *docx або *pdf розміщується у відповідному розділі дисципліни в Moodle та перевіряється протягом тижня після здачі. Оскарження оцінки може бути здійснене не пізніше двох тижнів з моменту оцінювання роботи.

Критерії оцінювання виконання лабораторних робіт максимум 5 балів:

- *81-100 % від макс. балів* - 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

- *61-80 % від макс. балів* - 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.

- *41-60 % від макс. балів* - 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.

• 21-40 % від макс. балів - 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.

• 1-20% від макс. балів - неповністю 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 не задовольняють для переважної більшості завдань; здійснив захист зі значними помилками та порушенням послідовності, які не зміг виправити.

2.5. Питання для самоперевірки

1. Які аварійні режими повинні відключати апарати захисту в мережах 0,4 кВ?
2. У чому різниця між захистом від перевантаження і від короткого замикання?
3. Поясніть призначення теплового та електромагнітного розчіплювачів автоматичного вимикача.
4. Лекції ЕСПС
5. Що таке відключна здатність I_{cu}/I_{cn} і чому вона критично важлива?
6. Для чого потрібні характеристики В/С/D та як їх вибирають?
7. Що таке селективність захистів і як її перевіряють за час-струмовими характеристиками?
8. Чим відрізняється ПЗВ від дифавтомата?
9. Як обирають значення $I_{\Delta n}$ 30/100/300 мА залежно від призначення?
10. Які наслідки може мати неправильний вибір апарата захисту занижений/завищений I_n ?
11. Яку роль відіграють обмежувачі перенапруг ОПН/УЗІП у комплексному захисті мереж?

2.6 Перелік рекомендованих джерел

1. Немировський А. Є. Електрообладнання електричних мереж, станцій і підстанцій. Інфра-Інженерія, 2020. 174 с.
2. Бахор З. М., Яцейко А. Я. Проектування підстанцій електричних мереж. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2023. 304 с.

3. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій : навч. посібник для студ. спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: О. В. Остапчук, П. Л. Денисюк, Ю. П. Матеєнко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 183 с.

4. Омельчук, А. О. Електрична частина станцій і підстанцій : навч. посіб. Київ : ЦП «КОМПРИНТ», 2017. 479 с.

5. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / А. Ю. Орлович та ін. Кропивницький : Видавець Лисенко В. Ф., 2019. 272 с.

Навчально-методичне видання

*Шрамко Юрій Юрійович
Мірошніченко Сергій Олександрович*

**ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ ТА МЕРЕЖ:
методичні вказівки до виконання
лабораторних робіт**

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції