

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ АПАРАТІВ

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни:
«Вибір та застосування електричних апаратів»

для студентів усіх форм навчання
спеціальності **G3 «Електрична інженерія»**
(освітня програма «Електричні та електронні апарати»)

Аналіз експлуатаційних режимів електричних апаратів. Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Вибір та застосування електричних апаратів» для студентів усіх форм навчання спеціальності G3 «Електрична інженерія» (освітня програма «Електричні та електронні апарати») / Укл.: О.В. Близняков. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2026. – 29 с.

Укладач: О.В. Близняков, доцент, к.т.н.

Рецензент: Л.Б. Жорняк, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено на засіданні кафедри
«Електричні та електронні апарати».
Протокол № 8 від 26 березня 2026 р.

Рекомендовано до видання
на засіданні НМК ЕТФ.
Протокол № 9 від 13 квітня 2026 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Практична робота №1. Визначення параметрів струму короткого замикання.....	6
1.1 Мета роботи	6
1.2 Предмет дослідження.....	6
1.3 Завдання	8
1.4 Методичні вказівки	9
1.5 Контрольні питання.....	11
2 Практична робота №2. Визначення параметрів перехідної поновлюваної напруги	12
2.1 Мета роботи	12
2.2 Предмет дослідження.....	12
2.3 Завдання	16
2.4 Методичні вказівки	16
2.5 Контрольні питання.....	18
3 Практична робота №3. Визначення перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів.....	19
3.1 Мета роботи	19
3.2 Предмет дослідження.....	19
3.3 Завдання	21
3.4 Методичні вказівки	21
3.5 Контрольні питання.....	23
4 Практична робота №4. Вибір високовольтного вимикача	24
4.1 Мета роботи	24
4.2 Предмет дослідження.....	24
4.3 Завдання	26
4.4 Методичні вказівки	28
4.5 Контрольні питання.....	29
Перелік джерел посилань.....	30

ВСТУП

Традиційно, значна частина навчального часу за освітньою програмою «Електричні та електронні апарати» присвячується вивченню фізичних процесів в електричних апаратах, принципам їх функціонування, розрахунку та конструюванню основних елементів. При цьому недостатньо уваги приділяється питанням правильного вибору електричних апаратів. Як показує практика, більшість випускників освітньої програми не займається розробкою нового електричного обладнання, але так чи інакше пов'язані з вибором, експлуатацією та ремонтом вже існуючих апаратів. Свого часу на зазначену невідповідність звернули увагу, але ці питання є актуальними і у наш час.

Таким чином, сучасний магістр електричної інженерії повинен не тільки повною мірою володіти теорією, методами розрахунку та конструювання електричних апаратів, але й питаннями правильного їх вибору та застосування. Запропонований цикл практичних занять призначений не тільки для підвищення якості компетенцій щодо аналізу експлуатаційних режимів та вибору електричних апаратів, але й удосконалення навичок роботи з програмами схемотехнічного моделювання, які останнім часом набули широкого поширення [5–7].

Для успішного і своєчасного виконання кожної практичної роботи студент повинний якісно до неї підготуватись поза розкладом практичних занять. Під час підготовки студент повинен вивчити теоретичний матеріал, ознайомитись з методичними вказівками відповідно до теми практичної роботи, а також скласти схемотехнічну модель відповідно до завдання. Відразу ж після початку аудиторного заняття вона повинна бути узгоджена з викладачем, що веде практичні заняття. Після виконання роботи студент повинен погодити з викладачем її результати. За результатами виконання кожної практичної роботи студент повинний надати і захистити звіт, оформлений відповідно до вимог ДСТУ 3008: 2015.

Перед виконанням циклу практичних робіт студенти повинні пройти інструктаж з техніки безпеки і внутрішнього розпорядку комп'ютерного класу і суворо дотримуватись відповідних правил під час виконання практичних робіт. Студенти, що не пройшли такий інструктаж до виконання практичних робіт не допускаються.

1 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Тривалість практичного заняття – 8 годин

1.1 Мета роботи

Метою роботи є вивчення методики і набуття практичного досвіду щодо визначення параметрів струму короткого замикання у високовольтній системі за допомогою комп'ютерних програм схемотехнічного моделювання.

1.2 Предмет дослідження

Коротким замиканням є будь-яке, не передбачене нормальним режимом експлуатації, електричне з'єднання окремих фаз з «землею» або між собою. Коротке замикання (к.з.) є аварійним режимом роботи електроустаткування і підлягає негайному вимкненню. Для забезпечення надійного функціонування вимикачів при виникненні короткого замикання їх комутаційна спроможність повинна бути погоджена з параметрами струму к.з. Отже, визначення параметрів струму к.з. є однією з головних задач при виборі вимикачів та іншого обладнання.

При виникненні короткого замикання в електричній системі виникає складний перехідний процес. Миттєве значення струму к.з. складається з двох складових: періодичної (симетричної) та аперіодичної (асиметричної).

Періодична складова, у загальному випадку, змінюється за синусоїдальним законом з частотою 50 (60) Гц, з амплітудою, яка поступово зменшується від початкового $I_{п0m}$ до усталеного значення $I_{п\infty m}$. Її змінення обумовлено зміненням ЕРС живлячих генераторів при збільшенні струмового навантаження. Тривалість усталення періодичної складової при короткому замиканні поблизу генератора, за звичаєм, складає від 3 до 5 секунд. Якщо генератор обладнаний автоматичним регулятором збудження (АРЗ), характер змінення амплітуди періодичної складової буде декілька іншим: спочатку процес відбувається ана-

логічно, а потім під дією АРЗ збільшується струм збудження генератора і його ЕРС, внаслідок чого амплітуда періодичної складової буде зростати. При короткому замиканні у віддалених точках електричних систем змінення періодичної складової практично відсутнє.

Аперіодична складова має максимальне значення в момент початку короткого замикання і надалі затухає за експоненціальним законом. Час загасання аперіодичної складової, як правило, не перевищує 0,2...0,5 с якщо точка к.з. знаходиться поблизу генератора. Абсолютне значення аперіодичної складової визначається потужністю джерела живлення, віддаленістю точки к.з. та фазою початку короткого замикання.

Задачею розрахунку струму к.з. є визначення його основних параметрів, а саме:

- *початкове діюче значення періодичної складової* $I_{п0}$, яке визначається через 0,01 с після початку короткого замикання;
- *діюче значення періодичної складової в момент початку розмикання головних контактів вимикача* $I_{пт}$
- *ударний струм короткого замикання* $i_{уд}$: максимальне миттєве значення струму к.з., яке спостерігається приблизно через 0,01 с після початку короткого замикання;
- *вміст аперіодичної складової*, яке визначається у відсотках по відношенню до амплітуди періодичної складової

$$\beta = \frac{i_a}{\sqrt{2} \cdot I_{пт}} 100\% ,$$

де i_a – миттєве значення аперіодичної складової струму к.з. в момент початку розмикання головних контактів вимикача.

Розрахунок параметрів струму к.з. для високовольтних систем здійснюється для найбільш важкого випадку – *трифазного металічного короткого замикання*, тобто, опір точки к.з. не враховують. Нехтують активними опорами елементів, які складають контур к.з., а також струмами намагнічування трансформаторів і насиченням їх магнітних систем, вважаючи кола лінійними та електрично зв'язаними.

Використання при розрахунку струму к.з. програм схемотехнічного моделювання дозволяє відмовитися від деяких допущень. Зок-

рема, можна враховувати активні опори елементів контуру КЗ, що дозволяє, у першу чергу, підвищити точність розрахунку параметрів струму к.з., а також визначити вміст його аперіодичної складової.

1.3 Завдання

1.3.1 Використовуючи можливості однієї з програм схемотехнічного моделювання [5–7], визначити параметри струму к.з. для заданої точки ділянки електричної системи, що надана на рис. 1.1.

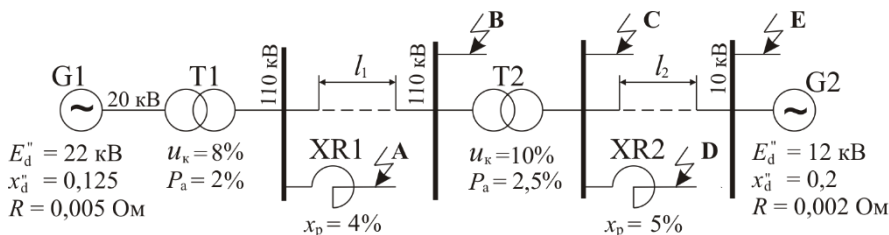


Рисунок 1.1 – Вихідна схема до завдання по роботі

Паспортні дані електричного обладнання надані у табл. 1.1.

1.4 Методичні вказівки

1.4.1 Сумарний час спрацьовування пристрою релейного захисту і власний час спрацьовування вимикача прийняти таким, що дорівнює 0,07 с.

1.4.2 Для заданої точки к.з. (див. рис. 1.1) скласти схему заміщення з зазначенням активних опорів та індуктивностей складових її елементів.

1.4.3 За паспортними даними електроустаткування (див. табл. 1.1) розрахувати активні опори й індуктивності елементів схеми заміщення в іменованих одиницях, використовуючи при цьому такі вирази:

а) фазові індуктивності живлячих генераторів:

$$L_{\Gamma} = x_d'' \frac{(E_d'')^2}{\omega S_H},$$

Таблиця 1.1 – Дані електроустаткування і місце короткого замикання

№ варіанту	S_{G1} , МВА	S_{T1} , МВА	l_1 , км	S_{T2} , МВА	S_{G2} , МВА	l_2 , км	I_n , А		Точка к.з.
							XR1	XR2	
1	800	30	100	250	320	3,0	2000	1600	A
2	630	250	45	63	150	1,5	1600	630	
3	320	250	50	40	100	0,5	1000	400	
4	250	180	70	100	200	1,0	630	320	
5	500	320	80	100	250	1,5	400	250	
6	100	100	30	80	120	0,8	160	100	B
7	150	100	90	50	100	0,9	200	160	
8	200	150	80	25	150	1,2	250	200	
9	400	320	70	32	200	1,4	630	320	
10	180	150	60	75	180	1,8	100	160	
11	800	630	100	250	320	3,0	2000	1600	C
12	630	250	45	63	150	1,5	1600	630	
13	320	250	50	40	100	0,5	1000	400	
14	250	180	70	100	200	1,0	630	320	
15	500	320	80	100	250	1,5	400	250	
16	100	100	30	80	120	0,8	160	100	D
17	150	100	90	50	100	0,9	200	160	
18	200	150	80	25	150	1,2	250	200	
19	400	320	70	32	200	1,4	630	320	
20	180	150	60	75	180	1,8	100	160	
21	800	630	100	250	320	3,0	2000	1600	E
22	630	250	45	63	150	1,5	1600	630	
23	320	250	50	40	100	0,5	1000	400	
24	250	180	70	100	200	1,0	630	320	
25	500	320	80	100	250	1,5	400	250	

де ω кутова частота джерела живлення $\omega = 2\pi f$ ($f = 50$ Гц);

x_d'' – надперехідний реактивний опір генератора по подовжній осі полюсів;

E_d'' – надперехідна ЕРС генератора, кВ;

S_n – повна номінальна потужність генератора, МВА;

б) фазові індуктивності силових трансформаторів відносно первинної обмотки:

$$L_r = \frac{u_{кз} \%}{100\%} \cdot \frac{U_H^2}{\omega S_H},$$

де $u_{кз}\%$ – напруга короткого замикання трансформатора, виражена у відсотках;

U_H – номінальна напруга первинної обмотки трансформатора, кВ;

S_H – повна номінальна потужність трансформатора, МВА;

в) фазова індуктивність струмообмежувальних реакторів:

$$L_p = \frac{x_p \%}{100\%} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot \omega \cdot I_H},$$

де $x_p\%$ – процентна реактивність реактора;

U_H, I_H – відповідно номінальні напруга і струм реактора;

г) активний опір, що доводиться на одну фазу трансформатора

$$R_r = \frac{P_a \%}{100\%} \frac{U_H^2}{S_H},$$

де P_a – активні втрати трансформатора, Вт;

д) активний опір генераторів зазначено на схемі (див. рис. 1.1);

е) активним опором струмообмежувальних реакторів знехтувати.

1.4.4 Схему заміщення і її параметри погодити з викладачем.

1.4.5 Визначити параметри струму к.з. за допомогою програми схемотехнічного моделювання (наприклад, Multisim); для цього необхідно:

а) увімкнути ПК;

б) завантажити програму;

в) побудувати схемотехнічну модель контуру короткого замикання і задати параметри її елементів);

г) досліджувати модель у сталому режимі: визначити діюче значення струму к.з. і занести його до таблиці 1.2;

д) досліджувати модель у перехідному режимі: записати осцилограму струму к.з., визначити ударне значення струму к.з. та вміст аперіодичної складової і занести їх до таблиці 1.2;

е) змінити фазу початку к.з. ψ і повторити пункт д);

Таблиця 1.2 – Параметри струму короткого замикання

Ψ, ел. град.	0	30	60	90	120	150	180
$I_{п0}$, кА							
$I_{пт}$, кА							
$i_{уд}$, кА							
β , %							

ж) як приклад, роздрукувати одну з осцилограм струму к.з. і підклеїти її у звіт з практичної роботи.

1.4.6 За отриманими даними побудувати графічні залежності.

1.4.7 Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) схемотехнічну модель (схему заміщення контуру к.з. з вказівкою параметрів його елементів);
- в) розрахунок параметрів елементів схеми заміщення;
- г) осцилограму струму к.з. (один з варіантів, як приклад);
- д) таблицю з параметрами струмів к.з. і графіки отриманих залежностей;
- е) висновки з роботи.

1.5 Контрольні питання

1.5.1 Що таке коротке замикання?

1.5.2 Яким чином діють пристрої релейного захисту при виникненні короткого замикання?

1.5.3 Які складові містить миттєве значення струму к.з.?

1.5.4 Який характер змінення у часі мають складові струму к.з.?

1.5.5 Назвіть та охарактеризуйте основні параметри струму к.з.

1.5.6 Для якого виду короткого замикання розраховуються параметри струму к.з.?

5.7 Які допущення приймаються при розрахунку параметрів струму к.з.?

2 ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕХІДНОЇ ПОНОВЛЮВАНОЇ НАПРУГИ

Тривалість практичного заняття – 8 години

2.1 Мета роботи

Метою лабораторної роботи є вивчення методики та проведення практичної роботи з розрахунку параметрів перехідної поновлюваної напруги при вимиканні короткого замикання за трансформатором з використанням комп'ютерних програм схемотехнічного моделювання.

2.2 Предмет дослідження

Перехідна поновлювана напруга (ППН) – це миттєве значення напруги на контактах комутаційного апарата в процесі поновлення напруги. ППН є одним з важливіших факторів, що визначає процес вимикання електричних кіл змінного струму. На сьогоднішній день достовірно встановлено, що комутаційну спроможність високовольтних вимикачів необхідно визначати не тільки параметрами струму к.з., але й параметрами перехідної поновлюваної напруги.

Характер та параметри ППН визначаються властивостями електричного кола, що вимикається, та властивостями вимикача. Проте, практичне значення має так звана **власна ППН, що визначається без урахування властивостей вимикача**. Такий підхід дозволяє однозначно оцінювати умови експлуатації вимикачів, оскільки *дійсна ППН*, що спостерігається в процесі вимикання кола реальним вимикачем, залежить також від властивостей його дугогасного пристрою. Отже, при вимиканні одного й того ж кола різними вимикачами характер і параметри ППН будуть різними, в той час як умови, що створюються при вимиканні струму к.з., будуть ідентичними.

Основними параметрами ППН є *частота власних коливань* та його *пікове значення* (для коливального характеру ППН); найбільш важливим параметром для високовольтних систем є *швидкість зростання ППН*. У нинішній час параметри ППН для високовольтних вимикачів регламентуються так званими *нормованими кривими*, які визначаються двома (при

$U_n = 6 \dots 35$ кВ) або чотирма (при $U_n \geq 110$ кВ) параметрами, а також *лініями запізнення* [1, 3, 7]. Крива власної ППН відповідає нормі, якщо вона не виходить за межі нормованої кривої та лише один раз перетинає лінію запізнення. Параметри ППН можуть бути розраховані або визначені експериментально.

Для розрахунку параметрів ППН у найпростіших контурах використовуються вирази, які отримані шляхом аналітичного вирішення диференціальних рівнянь, що описують процес поновлення напруги. Для розрахунку параметрів ППН складних систем досить часто використовують *метод зустрічного струму*. Використання сучасного програмного забезпечення ПК дозволяє використовувати при розрахунках параметрів ППН схемотехнічні моделі або вихідні диференціальні рівняння, одержуючи при цьому більш точні результати у наочній формі [1, 3, 4–7].

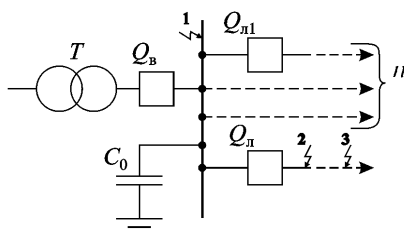
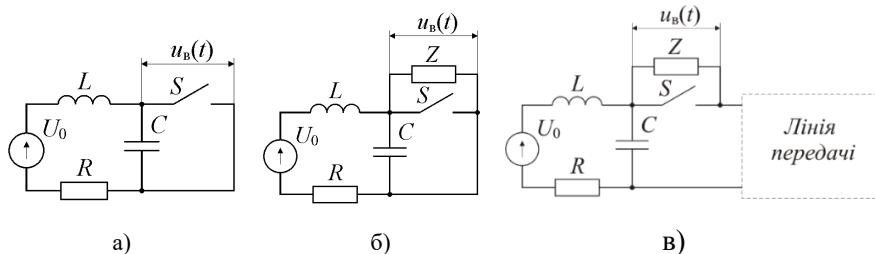


Рисунок 2.1 – Варіанти коротких замикань за трансформатором

Одним з найбільш поширених випадків розрахунку ППН є коротке замикання за трансформатором в схемі, що надана на рис. 2.1, на якому показані три основних варіанти короткого замикання: **1** – на шини розподільного пристрою; **2** – в лінії (на відносно невеликої відстані від лінійного вимикача); **3** – в лінії (на відносно великої відстані від лінійного вимикача).

Схеми для моделювання процесів поновлення напруги на першому гасильному полюсі надані на рис. 2.2.



а) точка 1; б) точка 2; в) точка 3

Рисунок 2.2 – Схеми для моделювання поновлення напруги:

Схеми містять ідеальний вимикач S , контакти якого розмикаються при переході струму дуги через нульове значення; R, L, C – параметри контуру, що визначаються паспортними даними трансформатора; Z – сумарний хвильовий опір ліній, підключених до шин розподільного пристрою за винятком пошкодженої.

Оскільки зворотна напруга U_0 змінюється дуже повільно у порівнянні з поновлюваною напругою, вона може бути прийнятою незмінною у часі. Її величина для трифазної системи визначається за такою формулою

$$U_0 = \sqrt{\frac{3}{2}} U_n,$$

де U_n – номінальна лінійна напруга.

Індуктивність фази трансформатора в режимі короткого замикання при промисловій частоті визначається за такою формулою:

$$L_{50} = \frac{u_k \%}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{2\pi f S_n}, \quad (2.1)$$

де $u_k\%$ – напруга короткого замикання трансформатора, виражена у відсотках;

S_n – номінальна потужність трансформатора;

f – частота мережі живлення.

Внаслідок вихрових струмів та інших факторів індуктивність трансформатора при високій частоті поновлюваної напруги буде приблизно на 20–30% нижче, отже:

$$L = (0,7 - 0,8) L_{50} \quad (2.2)$$

Ємність фази трансформатора може бути розрахована за емпіричною формулою, що запропонована Хаммарлундом:

$$C_\Phi = 70 \cdot \frac{S_n^{0,35}}{U_n^{0,175}}, \quad \frac{\text{пФ}}{\text{фаза}}. \quad (2.3)$$

Сумарна приведена ємність контуру з урахуванням ємності іншого електроустаткування, підключеного до шин розподільної установки C_0 визначається за таким виразом:

$$C = C_0 + \frac{C_{\Phi}}{2}. \quad (2.4)$$

Приведений активний опір контуру визначається сумарними активними втратами у міді і сталі трансформатора P_a :

$$R = \frac{P_a \% \cdot U_H^2}{100\% \cdot S_H}. \quad (2.5)$$

Сумарний хвильовий опір ліній визначається кількістю ліній підключених до шин (секції шин) розподільного пристрою за винятком пошкодженої n ,

$$Z = \frac{Z_n}{n}, \quad (2.6)$$

де Z_n – хвильовий опір однієї лінії, що у більшості випадків складає порядку 400–500 Ом.

Лінія передачі в програмах схемотехнічного моделювання являє собою елемент “Transmission line” з відповідними параметрами Z_n та TD (time delay), що визначається за такою формулою:

$$TD = \frac{1-s}{s} \cdot \frac{L}{Z_n}, \quad (2.7)$$

де s – ступінь віддаленості короткого замикання, яке являє собою відношення струму при короткому замиканні в лінії до струму к.з. безпосередньо за вимикачем; при випробуваннях вимикачів у режимі невіддаленого короткого замикання вона складає 0,6; 0,75; 0,9.

Лінія передачі може також бути представлена ланцюговою схемою, складеною, наприклад, індуктивно-ємнісними Γ -елементами, як показано на рис. 2.3.

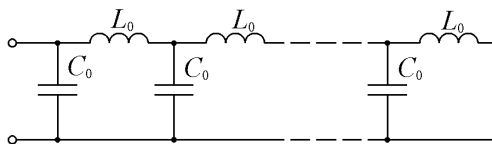


Рисунок 2.3 – Приклад моделювання лінії передачі ланцюговою схемою

$$L_0 = \frac{1-s}{s} \cdot \frac{L}{m}; \quad C_0 = \frac{L_0}{Z_d^2}, \quad (2.8)$$

де m – кількість елементів ланцюгової схеми, яка за звичаєм обирається у межах від 5 до 10.

2.3 Завдання

2.3.1 Вивчити методи розрахунку параметрів ППН.

2.3.2 Використовуючи програму схемотехнічного моделювання, визначити параметри власного ППН:

а) при вимиканні короткого замикання на шинах розподільного пристрою;

б) при вимиканні короткого замикання на початку лінії (безпосередньо за лінійним вимикачем);

в) при вимиканні невіддаленого короткого замикання.

2.3.3 Порівняти отримані криві з нормованою кривою ППН

2.4 Методичні вказівки

2.4.1 За паспортними даними трансформатора, що надані у таблиці 2.1, розрахувати параметри контуру: індуктивність, ємність і активний опір, використовуючи вирази (2.1–2.5).

2.4.2 Для виконання п. 2.3.2а завдання необхідно:

а) увімкнути ПК і завантажити програму схемотехнічного моделювання;

б) ввести схему заміщення для випадку 1 (див. рис. 2.2а); ідеальний вимикач S може бути замінений резистором з великим активним опором (100 кОм або більше);

Таблиця 2.1 – Паспортні дані силового трансформатора

№ вар.	Номинальна потужність, S_n , МВА	Номинальна напруга, U_n , кВ	Сумарні активні втрати, P_a , кВт	Напруга к.з., U_k , %	Сумарна ємність обладнання, C_0 , пФ
1	1,0	10	14,3	6,5	3500
2	1,6	20	20,2	6,5	4500
3	2,5	10	27,4	5,5	5000
4	6,3	20	55,9	6,5	5500
5	6,3	35	54,5	7,5	2000
6	10,0	35	77,3	7,5	3500
7	40,0	35	196,0	8,5	4500
8	80,0	35	333,0	9,5	5000
9	63,0	115	304,0	10,5	5500
10	80,0	115	580,0	10,5	3500
11	125,0	115	500,0	10,5	4500
12	250,0	121	800,0	10,5	5000
13	25,0	230	176,0	12,5	5500
14	63,0	230	395,0	12,5	2000
15	125,0	230	365,0	11,0	3500
16	250,0	230	670,0	11,0	4500
17	63,0	330	340,0	11,0	5000
18	200,0	347	747,0	10,0	5500
19	400,0	525	1120,0	13,0	4000
20	125,0	500	455,0	10,5	2500

в) користуючись отриманою кривою перехідної поновлюваної напруги, визначити її параметри:

- амплітудне значення поновлюваної напруги;
- середню швидкість зростання поновлюваної напруги;

г) отриману криву ППН вставити у звіт з практичної роботи.

2.4.3 Для виконання п. 2.3.2б завдання необхідно:

а) змінити опір резистора, що замінює ідеальний вимикач S , величиною, що розрахована за формулою (2.6) (кількість непошкоджених ліній прийняти такою, що дорівнює 5);

б) визначити початкову швидкість зростання ППВ;

в) отриману криву ППН вставити у звіт з практичної роботи.

2.4.4 Для виконання п. 2.3.2в завдання необхідно:

а) підключити до схеми модель лінії передачі (див. рис. 2.2в);

б) визначити початкову швидкість зростання ППВ;

в) отриману криву ППН вставити у звіт з практичної роботи.

2.4.5 Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) параметри силового трансформатора з указівкою варіанта;
- в) схема заміщення і розрахунок її параметрів;
- г) вихідні дані і отримані криві ППН;
- д) висновки з роботи.

2.5 Контрольні питання

2.5.1 Які чинники впливають на параметри ППН?

2.5.2 Пояснити характер кривої ППН при вимиканні короткого замикання на шинах розподільної установки.

2.5.3 Пояснити характер кривої ППН при вимиканні короткого замикання, що відбулося у лінії безпосередньо за вимикачем.

2.5.4 Пояснити характер кривої ППВ при вимиканні невіддаленого короткого замикання.

2.5.5 Чому невіддалені к.з. є найбільш тяжкими для вимикання?

3 ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРЕНАПРУГ ПРИ ВИМИКАННІ МАЛИХ ІНДУКТИВНИХ СТРУМІВ

Тривалість практичного заняття – 8 годин

3.1 Мета роботи

Метою лабораторної роботи є вивчення методики і проведення практичної роботи з визначення перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів за допомогою програм схемотехнічного моделювання.

3.2 Предмет дослідження

В практиці експлуатації електроустаткування малі індуктивні струми мають місце в силових трансформаторах, що працюють в режимі холостого ходу. Величини струмів холостого ходу потужних силових трансформаторів як правило не перевищують 50–100 А. Вимикання таких струмів високовольтними вимикачами з високою вимикальною спроможністю супроводжується, як правило, обривом струму до його природного проходження через нульове значення. Такий раптовий обрив називають *зрізом струму*. Слід зазначити, що зрізи струму можуть спостерігатись у будь-який момент відносно синусоїди струму, в тому числі, на його максимумі.

В момент зрізу струму електромагнітна енергія, що запасена в індуктивності, переходить в електростатичну. Внаслідок великої індуктивності трансформаторів в режимі холостого ходу, процес поновлення напруги на контактах вимикача, як правило, супроводжується значною перенапругою. Її величина може бути визначена з рівняння збереження енергії:

$$\frac{Cu_{\text{вмакс}}^2}{2} = \eta \frac{Li_{\text{зр}}^2}{2}, \quad (3.1)$$

де $i_{\text{зр}}$ – величина зрізу струму;

L – індуктивність фази трансформатора в режимі холостого ходу;

C – приведена ємність фази трансформатора;

η – коефіцієнт використання електромагнітної енергії, який враховує активні втрати енергії в міді і сталі трансформатора; його величина за звичаєм складає 0,3...0,45.

Таким чином рівняння (3.1) дозволяє визначити максимальне значення поновлюваної напруги:

$$u_{\text{Вмакс}} = \eta i_{\text{зр}} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (3.2)$$

Звичайно, що найбільша очікувана величина поновлюваної напруги буде у випадку зрізу в момент максимуму (амплітуди) струму:

$$u_{\text{Вмакс}}^{\text{н/б}} = \eta I_{0\text{м}} \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.3)$$

де $I_{0\text{м}}$ – амплітудне значення струму холостого ходу трансформатора, яке визначається за наступним виразом:

$$I_{0\text{м}} = \frac{U_{\text{м}}}{2\pi f L}, \quad (3.4)$$

де $U_{\text{м}}$ – амплітудне значення номінальної напруги трансформатора.

Отже, найбільша очікувана величина поновлюваної напруги з урахуванням виразу (3.4) буде визначатись за наступним виразом:

$$u_{\text{Вмакс}}^{\text{н/б}} = \eta \frac{U_{\text{м}}}{2\pi f \sqrt{LC}}. \quad (3.5)$$

Враховуючи вираз частоти поновлюваної напруги:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.6)$$

найбільша кратність амплітуди поновлюваної напруги по відношенню до амплітуди номінальної напруги буде визначатись кратністю її частоти по відношенню до промислової частоти:

$$\kappa_{н/б} = \frac{u_{в\max}^{н/б}}{U_m} = \eta \frac{f_0}{f}. \quad (3.7)$$

Вираз (3.7) показує, що втрати в трансформаторі суттєво знижують перенапруги при вимиканні струму холостого ходу. Але вони залишаються досить великими і являють серйозну небезпеку для ізоляції електрообладнання. Основними способами обмеження перенапруг є використання вентильних розрядників, а також шунтування комутаційних апаратів резисторами з активним опором.

3.3 Завдання

3.3.1 Ознайомитися з методикою розрахунку перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів [1, 9].

3.3.2 Використовуючи програму схемотехнічного моделювання (наприклад Multism) [4–6], визначити величини перенапруг при різних опорах шунтувального резистора та моменту зрізу струму відносно синусоїди струму.

3.3.3 По отриманим даним побудувати графічні залежності.

3.3.4 Зробити висновки з роботи.

3.5 Методичні вказівки

3.4.1 Моделювання процесу вимикання струму холостого ходу трансформатора здійснюється за схемою, яка надана на рис. 3.1.

Схема містить комутаційний елемент S , що розмикається без дуги з шунтувальним резистором $R_{ш}$, опір якого, у загальному випадку, є функцією струму, що протікає в процесі поновлення напруги. Схема містить

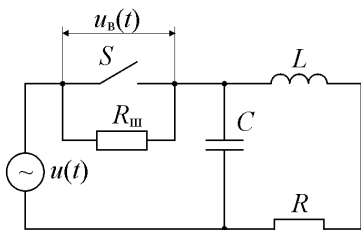


Рисунок 3.1 – Схема заміщення для розрахунку перенапруг

також індуктивність L , ємність C и активний опір R , обумовлені параметрами силового трансформатора в режимі холостого ходу.

3.4.2. За паспортними даними силового трансформатора, що надані у таблиці 3.1, розрахувати параметри схеми заміщення:

Таблиця 3.1 – Паспортні дані силових трансформаторів

№ вар.	Номінальна потужність, S_n , МВА	Номінальна напруга, U_n , кВ	Активні втрати, P_a , кВт	Струм холостого ходу I_0 , %
1	1,0	10	14,3	1,4
2	1,6	20	20,15	1,4
3	2,5	10	27,4	1,0
4	6,3	20	55,9	0,9
5	6,3	35	54,5	0,9
6	10,0	35	77,3	0,8
7	40,0	35	196,0	0,4
8	80,0	35	333,0	0,3
9	63,0	115	304,0	0,6
10	80,0	115	380,0	0,55
11	125,0	115	500,0	0,55
12	250,0	121	800,0	0,5

$$\text{➤ індуктивність: } L = \frac{100\%}{I_0\%} \cdot \frac{U_n^2}{2\pi f S_n},$$

де S_n , U_n – номінальна потужність і номінальна напруга обмотки трансформатора, відповідно;

$I_0\%$ – струм холостого ходу трансформатора, виражений у відсотках;

f – частота мережі живлення;

➤ ємність фази трансформатора практично не залежить від режиму його роботи і може бути розрахована за формулою Хаммарлунда (2.3); приведена ємність фази приймається такою, що дорівнює: $C = C_\phi/2$;

➤ приведений активний опір трансформатора визначається сумарними активними втратами в міді і сталі за формулою (2.5).

Для виконання п. 3.3.2 завдання необхідно:

а) увімкнути ПК та завантажити програму схмотехнічного моделювання;

- б) побудувати схему моделювання з відповідними параметрами;
- в) визначити величину перенапруги при зрізі на максимумі струму і занести її до таблиці 3.2 або 3.3 у відповідності до завдання;
- г) повторити пункт в) при інших значеннях опору шунтувального резистора та моменту зрізу струму відносно синусоїди струму;
- д) роздрукувати одну з кривих поновлюваної напруги і вставити її у звіт з практичної роботи.

3.4.3 Звіт з лабораторної роботи повинен містити.

- а) найменування і мету роботи;
- б) параметри силового трансформатора з указівкою варіанта;
- в) схема для моделювання і розрахунок її параметрів;
- г) крива поновлюваної напруги;
- д) таблиці і графічні залежності;
- е) висновки з роботи.

Таблиця 3.2 – Залежність перенапруги від опору шунтувального резистору

$R_{ш}$, кОм	0,5	1,0	5,0	10,0	50	100
$U_{в.макс}$, кВ						

Таблиця 3.3 – Залежність перенапруги від фази зрізу струму

$\varphi_{ср}$, ел. град.	0	50	60	90	120	150
$U_{в.макс}$, кВ						

3.5 Контрольні питання

- 3.5.1 Назвіть основну причину виникнення перенапруги при вимкненні малих індуктивних струмів.
- 3.5.2 Який характер має крива поновлюваної напруги при вимкненні малих індуктивних струмів?
- 3.5.3 Які методи використовують для розрахунку перенапруги при вимкненні малих індуктивних струмів?
- 3.5.4 Які чинники впливають на величину перенапруги при вимкненні малих індуктивних струмів?
- 3.5.5 Які міри застосовують для зниження перенапруги при вимкненні малих індуктивних струмів?

4 ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИМИКАЧА

Тривалість лабораторного заняття – 8 години

4.1 Мета роботи

Метою лабораторної роботи є вивчення методики і проведення практичної роботи з вибору високовольтних вимикачів для розподільної установки, а також перевірки їх працездатності за основними електричними параметрами.

4.2 Предмет дослідження

Високовольтний вимикач є основним комутаційним апаратом розподільних установок, надійність якого значною мірою визначає надійність і безперебійність електропостачання. Отже вибір високовольтних вимикачів є найбільше відповідальним етапом розробки розподільних та електротехнологічних установок.

У нинішній час силові високовольтні вимикачі використовуються в електричних системах напругою до 1200 кВ; струми, що вимикаються вимикачами досягають 80–100 кА. У розподільних установках високої та надвисокої напруги (110 кВ і вище) знайшли використання, головним чином, повітряні та елегазові вимикачі. При цьому, спостерігається тенденція до витиснення повітряних вимикачів елегазовими; в технічно розвинених країнах цей процес нині вже практично завершений.

В електричних системах середньої напруги (6–35 кВ) до нинішнього часу використовувались вимикачі різних видів: маломасляні, електромагнітні, елегазові, вакуумні. В останні роки, на промислових та мережевих установках (особливо з частими комутаційними операціями) вакуумні вимикачі практично повністю витіснили електромагнітні та маломасляні. Сучасний світовий ринок вимикачів середньої напруги приблизно на 80% формується за рахунок вакуумних вимикачів, приблизно на 20% – елегазових (переважно за рахунок верхньої частини діапазону), інші види вимикачів (маломасляні, електромагнітні) практично витіснені з ринку (не більше 1–2%).

Вибір високовольтних вимикачів здійснюється, поперед за все, за номінальними значеннями струму і напруги. Обраний вимикач перевіряється по стійкості при протіканні наскрізних струмів к.з. і комутаційної спроможності.

Вибір вимикачів за номінальними значеннями струму і напруги здійснюється у відповідності з наступними співвідношеннями:

$$I_{\text{н}} \geq I_{\text{нe/y}}; U_{\text{н}} \geq U_{\text{нe/y}},$$

де $I_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ – номінальний струм і номінальна напруга обраного вимикача, відповідно;

$I_{\text{нe/y}}$, $U_{\text{нe/y}}$ – номінальний струм і номінальна напруга даної електроустановки, відповідно.

Перевірка вимикача по стійкості при протіканні наскрізних струмів к.з. здійснюється у відповідності з такими співвідношеннями:

- по електродинамічній стійкості: $i_{\text{e/д ст}} \geq i_{\text{уд}} = \sqrt{2}k_{\text{уд}}I_{\text{п0}}$;

- по термічній стійкості: $I_{\text{т ст}} \geq I_{\text{п0}}$,

за умови, що час протікання наскрізного струму к.з. не перевищує припустимого для даного вимикача. Якщо ця умова не виконується, то термічна стійкість оцінюється по тепловій дії струму к.з.

$$I_{\text{т ст}}^2 \cdot t_{\text{доп}} \geq I_{\text{п0}}^2 \cdot t_{\text{кз}},$$

де $i_{\text{e/д ст}}$ – струм електродинамічної стійкості вимикача;

$I_{\text{т ст}}$ – струм термічної стійкості вимикача;

$I_{\text{п0}}$ – початкове діюче значення періодичної складової струму к.з.;

$k_{\text{уд}}$ – ударний коефіцієнт.

Перевірка вимикача по комутаційній спроможності здійснюється з умов надійного вимикання кола при виникненні короткого замикання, а також надійного вмикання на існуюче у колі коротке замикання, що можуть бути забезпечені при дотриманні таких співвідношень:

$$U_{\text{н}} \geq U_{\text{нe/y}}; I_{\text{в ном}} \geq I_{\text{п0}}; I_{\text{о ном}} \geq I_{\text{пр}},$$

де $I_{\text{в ном}}$ – номінальний струм вмикання вимикача;

$I_{\text{о ном}}$ – номінальний струм вимикання вимикача;

$I_{пр}$ – діюче значення струму КЗ в момент початку розмикання дугогасильних контактів вимикача; при КЗ у віддалених точках $I_{пр} = I_{п0}$; при КЗ поблизу генераторів $I_{пр}$ істотно відрізняється від $I_{п0}$ і може бути визначено по розрахунковим кривим [3];

г) вміст аперіодичної складової струму к.з. не повинен перевищувати нормованого значення:

$$\beta = \frac{i_a}{\sqrt{2} \cdot I_{пр}} \cdot 100\% \leq \beta_n,$$

де i_a – миттєве значення аперіодичної складової в момент початку розмикання дугогасильних контактів вимикача;

β_n – нормований відсотковий вміст аперіодичної складової, який визначається за нормованою кривою $\beta_n = f(t_{кз})$, де $t_{кз}$ є найменшим можливим часом з моменту початку короткого замикання до початку розмикання його дугогасних контактів, який визначається сумою:

$$t_{кз} = t_{спрв} + t_{спррз},$$

де $t_{спрв}$ – власний час спрацьовування вимикача при вимиканні кз;

$t_{спррз}$ – час спрацьовування пристрою релейного захисту з урахуванням селективної його дії;

д) крива власної ППН даної електричної системи повинна лежати нижче за нормовану криву, яка визначається:

- двома параметрами U_0 і t_1 при $U_n = 6-35$ кВ;
- чотирма параметрами U_1 , U_c , t_1 і t_2 при $U_n \geq 110$ кВ.

Ці параметри залежать від номінальної напруги, а також процентного відношення вимикаемого струму кз до номінального струму вимикання вимикача [7].

4.3 Завдання

Здійснити вибір ввідного Q_v та лінійного Q_l вимикачів для розподільної установки підстанції, схема якої надана, на рис. 4.1 і перевірити їх працездатність при виникненні короткого замикання.

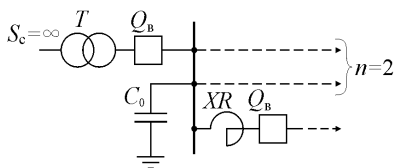


Рисунок 4.1 – Однолінійна схема розподільної установки підстанції

Паспорти дані електроустаткування, а також сумарна ємність електроустаткування, що приєднана до збірних шин розподільної установки, надані у таблиці 4.1. Час спрацьовування пристрою релейного захисту прийняти таким, що дорівнює 0,07 с. При розрахунках прийняти, що трансформатор живиться від системи безкінечної потужності.

Таблиця 4.1 – Паспортні дані електроустаткування

№ вар.	Трансформатор				Струмообмежувальний реактор			C ₀ , пФ
	U _н , кВ	S _н , МВА	U _к , %	P _а , кВт	I _н , А	x _p , %	P _а , кВт	
1	10	6,3	10,5	62,0	-	-	-	3500
2		10,0		78,8	630	3,5	3,9	2500
3		16,0		116,0	630	2,5	2,5	3000
4		25,0		179,0	630	2,5	2,5	4500
5		32,0		189,0	630	3,5	3,2	1800
6		40,0		237,0	1000	3,5	3,5	4500
7		63,0		308,0	630	3,5	3,2	3800
8		80,0		400,0	3000	3,5	3,5	2800
9	35	32,0	10,4	177	200	6	-	3200
10		40,0		237	500	10	-	2800
11		63,0		260	500	10	-	5000
12		80,0		305	1000	10	-	2000
13		10,0		335	1000	10	-	4000
14		160,0		480	1000	10	-	5500
15	110	80,0	10,5	470	650	15	-	3800
16		125,0		520	650			2500
17		160,0		605	650			4000
18		200,0		720	1350			4500
19		250,0		840	1350			4200
20		400,0		1222	1350			2200
21	220	250,0	12,0	890	325	12	-	3800
22		320,0		1020				2500
23		400,0		1210				4000
24		630,0		1610				4500
25		800,0		2130				3500

4.4 Методичні вказівки

4.4.1 Розрахувати струм навантаження ввідного вимикача виходячи з умови 90% завантаження силового трансформатора, тобто

$$\sqrt{3}I_n U_n = 0,9S_n.$$

4.4.2 Струм навантаження лінійного вимикача прийняти таким, що дорівнює номінальному струму струмообмежувального реактора.

4.4.3 За номінальною напругою вторинної обмотки силового трансформатора і струмами навантаження вибрати ввідний і лінійний вимикачі та записати їх основні параметри: I_n , U_n , $I_{T\text{ст}}$, $i_{e/d\text{ст}}$, $I_{o\text{ном}}$, $I_{b\text{ном}}$.

4.4.4 Визначити параметри струму к.з., для чого необхідно:

а) скласти схему заміщення контуру к.з. з урахуванням активних та реактивних опорів його елементів;

б) розрахувати фазові індуктивності й активні опори елементів схеми заміщення (див. практичну роботу № 1);

в) увімкнути ПК і завантажити програму схемотехнічного моделювання;

г) у відповідності до схеми заміщення побудувати схемотехнічну модель і визначити параметри струму кз: $I_{п0}$, $I_{пr}$, $i_{уд}$ та β ;

д) вихідні дані та отриману криву струму к.з. вставити у звіт з практичної роботи.

4.4.5 Зробити висновки про працездатність вимикачів щодо стійкості вимикачів при протіканні наскрізних струмів к.з. (за термічною та електродинамічною стійкістю);

4.4.6 Визначити параметри ППН для ввідного та лінійного вимикачів, для чого необхідно:

а) розрахувати фазові ємності елементів і сумарну приведену ємність контуру (див. практичну роботу № 2);

б) увімкнути ПК і завантажити програму схемотехнічного моделювання;

в) побудувати схемотехнічні моделі для визначення параметрів ППН для ввідного і лінійного вимикачів (див. практичну роботу № 2);

г) визначити криві поновлюваної напруги і зробити висновки щодо їх відповідності нормованим кривим [7].

4.4.7 Враховуючі параметри струму к.з. та ППН, зробити висновки про працездатність вимикачів щодо їх спроможності вмикання та вимикання пошкодженої ділянки при виникненні короткого замикання. При необхідності вибрати інші вимикачі.

4.4.8. Звіт з лабораторної роботи повинен містити:

- а) найменування та мету роботи;
- б) електричну схему підстанції і параметри електроустаткування з вказівкою варіанту;
- в) типи й основні параметри обраних вимикачів;
- г) розрахунки параметрів схем заміщення;
- д) отримані криві струму к.з., та його параметри;
- е) отримані криві ППН та її параметри;
- ж) висновки про працездатність обраних вимикачів при протіканні наскрізних струмів КЗ та їх комутаційної спроможності.

4.5 Контрольні питання

4.5.1 В яких електроустановках використовуються високовольні вимикачі?

4.5.2 Які функції виконують високовольні вимикачі в електроустановках?

4.5.3 За якими параметрами здійснюється вибір високовольних вимикачів?

4.5.4 За якими параметрами здійснюється перевірка високовольних вимикачів?

4.5.5 Що таке комутаційна спроможність вимикача?

4.5.6 За якими параметрами оцінюється стійкість вимикача при протіканні наскрізних струмів КЗ?

4.5.7 За якими параметрами оцінюється комутаційна спроможність вимикача?

4.5.8. Як оцінюється комутаційна спроможність вимикача за параметрами ППН?

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Омельчук А.О. Електрична частина станцій і підстанцій: навч. посібник. Київ: ЦП «КОМПРИНТ», 2017. С. 479
2. Буряк В.М., Дейнеко Н.А. Вибір електричних апаратів захисту в мережах до 1000 В: навчально-методичний посібник. Харків: ХНАМГ, 2007. С. 62
3. Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для вузів. 2-е вид., доправ. та допов. За ред. Академіка НАН України Г.Г. Півняка. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. С. 597
4. Переверзєв А.В., Бойко В.І., Зорі А.А., Тарасюк В.П., Вошна О.В., Багрій В.В. Моделювання в електроніці: підручник. 2-ге вид., перероб. і доповн. Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. С. 352
5. Бондаренко І.М., Свідерська Л.І., Грицунов О.В. Моделювання в електроніці: навчальний посібник. Харків: ХНУРЕ, 2020. С. 163
6. Макаренко В., Співак В. Схемотехнічне моделювання як засіб для пояснення процесів в електричних колах: Наукові записи [Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка]. Серія: Проблеми методики фізико-математичної і технологічної освіти. 2015. Вип. 8(1). – С. 181–185. http://nbuv.gov.ua/UJRN/nz_pmf_m_2015_8%281%29_46
7. Норми випробування електрообладнання. СОУ-Н ЕЕ 20.302: 2020. Міністерство енергетики та захисту довкілля України, ПАТ Національна енергетична компанія «Укренерго». Харків: ІНДУСТРІЯ, 2021. С. 232.
8. Garzon R. High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications. Second Edition, Revised and Expanded. New York and Basel: Marcel Dekker, 2002. P. 473
9. Lou van der Sluis. Transients in Power Systems. Chichester•New York•Weinheim•Brisbane•Singapore•Toronto: John Wiley & Sons Ltd, 2001. P. 207
10. Browne T.E. Circuit Interruption: Theory and Techniques. – New York and Basel: Marcel Dekker, 1984. – 701 p.