

Міністерство освіти і науки України
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до лабораторних робіт з дисципліни:
"Експлуатація електричних та електронних апаратів"

для студентів усіх форм навчання за спеціальністю:
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(освітня програма «Електричні та електронні апарати»)

Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Експлуатація електричних та електронних апаратів" для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (освітня програма «Електричні та електронні апарати») / Укл.: О.В. Близняков. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2019. – 29 с.

Укладач: Близняков Олександр Вікторович, доцент, к.т.н.

Рецензент: Коцур Михайло Ігорович, доцент, к.т.н.

Відповідальний за випуск: Мохнач Річард Едуардович

Затверджено на засіданні кафедри
“Електричні та електронні апарати”.
Протокол №7 від 26 грудня 2018 р.

Рекомендовано до видання на засіданні
навчально-методичної комісії
електротехнічного факультету.
Протокол №6 від 24 січня 2019 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1. Лабораторна робота №1. Визначення параметрів струму короткого замикання	5
1.1 Мета роботи.....	5
1.2 Предмет дослідження.....	5
1.3 Завдання	6
1.4 Методичні вказівки	6
1.5 Контрольні питання	9
2. Лабораторна робота №2. Визначення параметрів перехідної поновлюваної напруги	10
2.1 Мета роботи.....	10
2.2 Предмет дослідження.....	10
2.3 Завдання	16
2.4 Методичні вказівки	16
2.5 Контрольні питання	17
3. Лабораторна робота №3. Визначення перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів	18
3.1 Мета роботи.....	18
3.2 Предмет дослідження.....	18
3.3 Завдання	21
3.4 Методичні вказівки	21
3.5 Контрольні питання	22
4. Лабораторна робота №4. Вибір високовольтного вимикача	23
4.1 Мета роботи.....	23
4.2 Предмет дослідження.....	23
4.3 Завдання	25
4.4 Методичні вказівки	25
4.5 Контрольні питання	27
ЛІТЕРАТУРА.....	29

ВСТУП

Традиційно значна частина навчального часу за освітньою програмою «Електричні та електронні апарати» присвячується, головним чином, вивченню теорії електричних апаратів, розрахунку, конструюванню та оптимізації окремих їх елементів, питанням проектування апаратів у цілому. Проте, сучасний фахівець, що навчається за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» не може не володіти також питаннями, що пов'язані з експлуатацією електричних та електронних апаратів, оскільки все ж переважна більшість фахівців електротехнічного профілю у практичній діяльності зайнята саме цими питаннями. Запропонована студентам дисципліна призначена, у певній мірі, ліквідувати зазначений недолік. Зокрема, запропонований цикл лабораторних робіт призначений не тільки для придбання студентами навичок розрахунку основних експлуатаційних режимів електричних апаратів, але й удосконалення навичок роботи з комп'ютерною технікою і відповідними програмами схемотехнічного моделювання, що останнім часом набули широкого поширення [14–15].

Для успішного і своєчасного виконання кожної лабораторної роботи студент повинний якісно до неї підготуватись поза розкладом лабораторних занять. Під час підготовки студент повинен вивчити теоретичний матеріал, ознайомитись з методичними вказівками відповідно до теми лабораторної роботи, а також скласти схемотехнічну модель відповідно до завдання. Відразу ж після початку аудиторного заняття вона повинна бути узгоджена з викладачем, що веде лабораторні роботи. Після виконання роботи студент повинен погодити з викладачем її результати. За результатами виконання кожної лабораторної роботи студент повинний надати і захистити звіт, оформлений відповідно до вимог СТП 15-96.

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

1. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СТРУМУ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

1.1 Мета роботи

Метою лабораторної роботи є вивчення методики і проведення практичної роботи з визначення параметрів струму короткого замикання у високовольтній системі за допомогою комп'ютерних програм схемотехнічного моделювання.

1.2. Предмет дослідження

Коротким замиканням (КЗ) є будь-яке, не передбачене нормальним режимом експлуатації, електричне з'єднання окремих фаз з "землею" або між собою. КЗ є аварійним режимом роботи електроустаткування і підлягає негайному вимиканню. Для забезпечення його надійного вимикання комутаційна спроможність апаратів повинна бути погоджена з параметрами струму КЗ. Таким чином, визначення параметрів струму КЗ є однією з головних задач при виборі комутаційних апаратів і іншого електроустаткування.

При КЗ в електричній системі виникає складний перехідний процес. При цьому, миттєве значення струму КЗ складається з двох складових: періодичної (симетричної) і аперіодичної (асиметричної).

Періодична складова – у загальному випадку змінюється за синусоїдальним законом з частотою 50 Гц, з амплітудою, яка поступово зменшується, а згодом переходить у стає значення I_{∞} . Її змінювання обумовлена зміною магнітного поля генератора при КЗ. Тривалість усталення періодичної складової при КЗ поблизу генератора складає порядку 3...5 с. Якщо генератор має АРЗ, характер зміни амплітуди періодичної складової буде декілька іншим: спочатку процес відбувається аналогічно, а потім під дією АРЗ збільшується струм збудження генератора і його МРС, внаслідок чого амплітуда періодичної складової буде зростати. При КЗ у віддалених від генераторів точках електричних систем зміни періодичної складової не спостерігається.

Аперіодична складова – має максимальне значення в момент початку КЗ і надалі затухає за експоненціальним законом. Час загасання аперіодичної складової як правило не перевищує 0,2...0,5 с при КЗ поб-

лізу генератора. Абсолютне значення аперіодичної складової визначається потужністю джерела, віддаленістю КЗ і фазою його початку.

Задачею розрахунку струму КЗ є визначення його основних параметрів:

- *початкове діюче значення періодичної складової $I_{п0}$, яке визначається через 0,01 с після початку КЗ;*
- *діюче значення періодичної складової в момент початку розмикання контактів вимикача $I_{пт}$*
- *ударний струм короткого замикання i_{y0} – максимальне миттєве значення струму КЗ, яке спостерігається приблизно через 0,01 с після початку КЗ;*
- *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 у момент початку розмикання контактів вимикача.

Розрахунок струму КЗ для високовольних систем здійснюється для найбільш важкого випадку – трифазного КЗ, хоча в реальності він спостерігається не більш ніж у 5% випадків КЗ. При розрахунку виходять з умови металевого КЗ, зневажаючи опором місця КЗ, а також активними опорами елементів. При розрахунку зневажають також струмами намагнічування трансформаторів і насиченням їх магнітних систем, вважаючи кола лінійними і електрично зв'язаними.

Використання при розрахунку струму КЗ програми схемотехнічного моделювання дозволяє відмовитися від деяких допущень. Зокрема, можна враховувати активні опори елементів контуру КЗ, що дозволяє, у першу чергу, підвищити точність розрахунку параметрів струму КЗ, а також визначити вміст його аперіодичної складової.

1.3 Завдання

Використовуючи можливості однієї з програм схемотехнічного моделювання [14–15], визначити параметри струму КЗ для заданої точки ділянки електричної системи, що надана на рис. 1.1. 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.

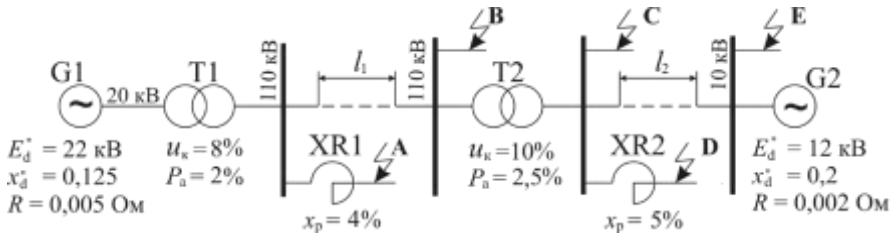


Рисунок 1.1 – Вихідна схема до завдання по роботі

Таблиця 1.1 – Дані електроустаткування і місце КЗ

№ в-та	S_{G1} МВА	S_{T1} МВА	I_1 кМ	S_{T2} МВА	S_{G2} МВА	I_2 кМ	XR1	XR2	Точка КЗ
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	

1.4.2 Для заданої точки КЗ (див. рис. 1.1) скласти однофазну схему заміщення з зазначенням активних опорів і індуктивностей складових її елементів. МРС живлячих генераторів у схемі потрібно зменшити у $\sqrt{3}$ раз.

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:

$$L_T = x_d'' \frac{E_G^2}{\omega S_H},$$

де ω кутова частота джерела, $\omega = 2\pi f$; $f = 50$ Гц;

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

E_G – МРС генератора, кВ;

S_H – повна номінальна потужність генератора, МВА;

б) фазові індуктивності силових трансформаторів відносно первинної обмотки:

$$L_T = \frac{u_{K3} \%}{100\%} \cdot \frac{U_H^2}{\omega S_H},$$

де $u_{K3} \%$ – 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

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

де P_a – активні втрати трансформатора, Вт;

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

е) активним опором струмообмежувальних реакторів зневажити.

1.4.4 Схему заміщення і її параметри погодити з викладачем.

1.4.5 Визначити параметри струму КЗ за допомогою однієї з програм схмотехнічного моделювання, для чого необхідно:

- а) увімкнути ПК;
- б) завантажити відповідну програму схмотехнічного моделювання: наприклад, Electronics Workbench;
- в) побудувати схмотехнічну модель контуру короткого замикання і задати параметри її елементів);
- г) досліджувати модель у сталому режимі: визначити діюче значення струму КЗ і занести його до таблиці 1.2;
- д) досліджувати модель у перехідному режимі: записати осцилограму струму КЗ, визначити ударне значення струму КЗ і занести його до таблиці 1.2;

Таблиця 1.2 – Параметри струму короткого замикання

Ψ, ел. град.	0	30	60	90	120	150	180
$I_{п0}$, кА							
$I_{пт}$, кА							
i_{y0} , кА							
β , %							

- е) змінити фазу початку КЗ ψ і повторити пункт д;
 - ж) як приклад, роздрукувати одну з осцилограм струму КЗ і підклеїти її у звіт з лабораторної 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) схмотехнічну модель (схему заміщення контуру КЗ з вказівкою параметрів його елементів);
 - в) розрахунок параметрів елементів схеми заміщення;
 - г) осцилограму струму КЗ (один з варіантів, як приклад);
 - д) таблицю з параметрами струмів КЗ і графіки отриманих залежностей;
 - е) висновки з роботи.

1.5 Контрольні питання

1.5.1 Що називається коротким замиканням?

1.5.2 Яким чином діють при КЗ пристрої релейного захисту?

1.5.3 З яких складових складається миттєве значення струму КЗ?

1.5.4 Який характер зміни мають складові струму КЗ?

1.5.5 Назвіть основні параметри струму КЗ

1.5.6 Для якого виду КЗ і чому ведуть розрахунок параметрів струму КЗ?

5.7 Які допущення приймаються при розрахунку параметрів струму КЗ?

2. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕХІДНОЇ ПОНОВЛЮВАНОЇ НАПРУГИ

Тривалість лабораторного заняття – 4 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 сучасного програмного забезпечення ПК, в тому числі 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 комутаційна спроможність комутаційних апаратів необхідно визначати не тільки параметрами вимикаємого струму КЗ, але й параметрами ППН.

Відомо, що контакти комутаційних апаратів (за виключенням синхронних) розмикаються у будь-який момент відносно синусоїди струму. В цей момент між контактами виникає електродуговий розряд, напруга у міжконтактному проміжку до кінця напівхвилі струму змінюється відповідно до вольт-амперної характеристики дуги. Безпосередньо за переходом струму через нульове значення електродуговий розряд набуває якісно нових властивостей – властивостей „залишкового ствола дуги”. При цьому відбуваються процеси поновлення міцності та поновлення напруги. Якщо в якийсь момент поновлювана напруга перевищить понов-

лювану міцність, то знову виникне електродуговий розряд, який буде існувати до кінця наступного напівперіоду струму. Якщо ж поновлювана міцність буде більше за поновлювану напругу, то електрична дуга у наступний напівперіод не виникне, напруга між контактами поновиться до т.з. *зворотної напруги*, тобто напруги промислової частоти, що поновлюється на контактах комутаційного апарата. Слід зазначити, що поновлення напруги не може відбутись миттєво, оскільки реальні елементи електричної системи (генератори, трансформатори, лінії електропередач, реактори і т.д.) мають ємність. Таким чином, виникає перехідний процес поновлення напруги.

Характер та параметри ППН визначаються властивостями електричного кола, що вимикається, та властивостями комутаційного апарата. Але практичне значення має т. з. *власна ППН*, параметри якої визначаються **без урахування властивостей комутаційного апарата**, а лише з урахуванням властивостей електричного кола, що вимикається. Такий підхід дозволяє однозначно оцінювати умови експлуатації комутаційних апаратів, оскільки *дійсна ППН*, що спостерігається в процесі вимикання кола реальним комутаційним апаратом, залежить також від типу дугогасильного пристрою та його властивостей. Отже, при вимиканні одного й того ж кола різними апаратами характер і параметри ППН будуть різними, в той час як умови експлуатації 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 комутаційних апаратів високої напруги регламентуються т.з. *нормованими огинаючими кривими*, які визначаються двома (при $U_n = 6 \dots 35$ кВ) або чотирма (при $U_n \geq 110$ кВ) параметрами, а також *лініями запізнення*. Ці параметри залежать від номінальної напруги апарата, а також величини струму, що вимикається по відношенню до його номінального струму вимикання [7, 10–12]. Крива ППН буде відповідати нормі, якщо вона не виходить за межі огинаючої кривої та лише один раз перетинає лінію запізнення. При випробуванні вимикачів високої напруги з метою забезпечення запасу створюється крива ППН, яке проходить дещо вище за огинаючу криву.

Для комутаційних апаратів низької напруги у відповідності до ДСТУ 2933-94 параметри ППН задаються *власною частотою* f_0 та *коефіцієнтом амплітуди* k_a , які визначаються за наступними формулами:

$$f_0 = AI_0^{0,2}U_0^{-0,8} \pm 10\%, \text{ кГц};$$

$$\kappa_a = B + C \cdot \exp(-0,016AI_0^{0,2}U_0^{-0,8}) \pm 0,05,$$

де I_0 – величина струму, що вимикається;

U_0 – зворотна напруга;

A, B, C – константи, що залежать від умов експлуатації апарата.

Параметри ППН можуть бути розраховані, проте якщо електрична система має складну конфігурацію, містить елементи з розподіленими параметрами, розрахункове визначення параметрів ППН дуже ускладнено. Достатньо часто звертаються до експериментального визначення параметрів ППН.

Для розрахунку параметрів перехідної поновлюваної напруги (ППВ) у найпростіших контурах використовуються вирази, які отримані шляхом аналітичного рішення диференціальних рівнянь, що описують окремі випадки процесів поновлення напруги [1–3,7,8,13]. Для розрахунку параметрів ППВ складних систем досить часто використовують *метод зустрічного струму*. Даний метод заснований на теоремі Тевенена, відповідно до якої поновлювана напруга за розміром та формою збігається з напругою, яку необхідно прикласти до контактів вимикача, щоб у ньому пішов такий струм, що дорівнює вимикаємому струмові, але протилежно спрямований до нього. Таким чином, процес вимикання струму короткого замикання замінюється вмиканням у гілку замкнутого вимикача умовного джерела живлення, що забезпечує в даній гілці такий струм, що дорівнює за розміром струмові КЗ, що вимикається, але протилежний йому за напрямком при закорочених затисках генераторів. В результаті цього струм у даній гілці стає рівним нулю, що тотожно вимиканню вимикачем струму КЗ.

Метод зустрічного струму застосовується у сполученні з операторним методом, при цьому зображення шуканої поновлюваної напруги має такий вигляд:

$$U_{\text{в}}(p) = i(p) \cdot Z(p),$$

де $i(p)$ – зображення по Лапласу струму КЗ, що вимикається;

$Z(p)$ – зображення по Лапласу опору кола відносно контактів вимикача при замкнутих накоротко затисках генератора [13].

Таким чином, знаючи зображення по Лапласу струму КЗ і опір системи відносно контактів вимикача можна розрахувати зображення по Лапласу поновлюваної напруги і шляхом зворотного перетворення

Лапласа одержати шуканий вираз поновлюваної напруги.

Істотною перевагою методу зустрічного струму є відносна універсальність, що дозволяє розрахувати поновлювану напругу, у колах з відносно складною конфігурацією. Проте суттєвим його недоліком є, насамперед, складність в реалізації, пов'язане з прямим і зворотним перетворенням Лапласа; до того ж, одержувані вирази поновлюваної напруги часто виявляються досить громіздкими, у зв'язку з чим визначення необхідних параметрів ППВ суттєво ускладнюється.

Використання сучасного програмного забезпечення ПК дозволяє використовувати при розрахунках параметрів ППВ електронні моделі або вихідні диференціальні рівняння, що описують процес поновлення напруги, одержуючи при цьому більш точні результати у наочній формі.

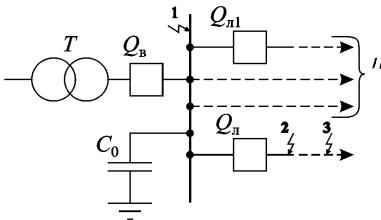


Рисунок 2.1 – Варіанти коротких замикань за трансформатором

Одним з найбільш поширених випадків розрахунку ППВ є КЗ за трансформатором в схемі, що надана на рис. 2.1, де показані три основних варіанти короткого замикання: **1** – на шинах розподільного пристрою; **2** – на початку лінії, тобто безпосередньо за лінійним вимикачем; **3** – в лінії (невіддалене КЗ).

Схеми для моделювання процесів поновлення напруги на першому гасячому полюсі надані на рис. 2.2а (точка 1), рис. 2.2б (точка 2) та рис. 2.2в (точка 3).

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.

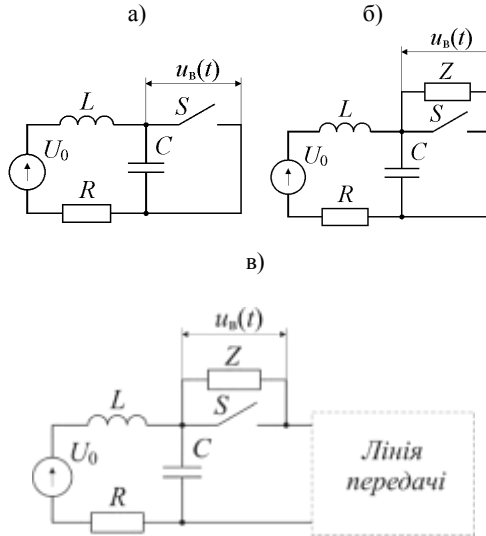


Рисунок 2.2 – Схема заміщення для розрахунку параметрів ППВ

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, тобто

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

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

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

Сумарна приведена ємність контуру з урахуванням ємності ін-

шого електроустаткування, підключеного до шин розподільного пристрою 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 стали трансформатора P_a .

$$R = \frac{P_a \% U_n^2}{100\% S_n}. \quad (2.5)$$

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

$$Z = \frac{Z_{\text{л}}}{n}. \quad (2.6)$$

де $Z_{\text{л}}$ – хвильовий опір однієї лінії, що у більшості випадків складає порядку 400–500 Ом.

Лінія передачі в програмі Electronics Workbench моделюється за допомогою елемента “Transmission line” з відповідними параметрами $Z_{\text{л}}$ та TD (time delay), що визначається за такою формулою

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

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

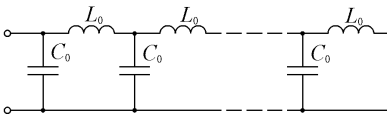


Рисунок 2.3 – Приклад моделювання лінії передачі ланцюговою схемою

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

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

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 ППВ.

2.3.2 Використовуючи можливості комп'ютерної програми Electronics Workbench, розрахувати параметри власного ППВ:

а) при вимиканні короткого замикання на шинах розподільного пристрою;

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

в) при вимиканні короткого замикання в лінії (невіддаленого КЗ).

2.3.3 Порівняти отримані криві з нормованою обвідною кривою ППВ

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).

Таблиця 2.1 – Паспортні дані силового трансформатора

№ вар.	Номінальна потужність S_n , МВА	Номінальна напруга, U_n , кВ	Сумарні активні втрати P_a , кВт	Напруга КЗ 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

2.4.2 Для виконання п. 2.3.2а завдання необхідно:

- а) увімкнути ПК і завантажити необхідну програму (наприклад, Electronics Workbench);
- б) ввести схему заміщення для випадку **1** кз; ідеальний вимикач **S** може бути замінений резистором з великим активним опором (100 кОм або більше);
- в) визначити параметри ППВ:
 - амплітудне значення поновлюваної напруги;
 - середню швидкість зростання поновлюваної напруги;
- г) роздрукувати криву ППВ та підклеїти її у звіт з лабораторної 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) роздрукувати криву ППВ та підклеїти її у звіт з лабораторної 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) роздрукувати криву ППВ та підклеїти її у звіт з лабораторної 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 розраховані осцилограми;
- д) висновки з роботи.

2.5 Контрольні питання

2.5.1 Які існують методи розрахунку поновлюваної напруги при короткому замиканні?

2.5.2 В чому полягає метод зустрічного струму?

2.5.3 Які переваги має метод, заснований на безпосередньому рішенні системи диференціальних рівнянь?

2.5.4 Які чинники впливають на параметри ППВ?

2.5.5 Пояснити характер кривої ППВ при вимиканні КЗ на шинах

розподільного пристрою.

2.5.6 Пояснити характер кривої ППВ при вимиканні КЗ, що відбулося у лінії безпосередньо за вимикачем.

2.5.7 Пояснити характер кривої ППВ при вимиканні невіддаленого КЗ.

2.5.8 Чому невіддалені КЗ є найбільш тяжкими для вимикання?

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

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

3.1 Мета роботи

Метою лабораторної роботи є вивчення методики і проведення практичної роботи з розрахунку перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів за допомогою сучасного програмного забезпечення ПК, в тому числі програм схемотехнічного моделювання.

3.2 Предмет дослідження

В практиці експлуатації електроустановок 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, однак при їх вимиканні виникають певні складності. Вимикання таких струмів висковольтними вимикачами з високою вимикальною спроможністю супроводжується, як правило, обривом струму до його природного проходження через нульове значення. Такий раптовий обрив називають *зрізом струму*. Причому, зрізи струму можуть спостерігатись у будь-який момент відносно синусоїди струму, в тому числі і на максимумі струму.

В момент зрізу струму електромагнітна енергія, що запасена в індуктивності, переходить в електростатичну. В цей момент починається процес поновлення напруги, який супроводжується значними перенапругами. При цьому, величина перенапруги може бути визначена з рівняння збереження енергії

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

де $i_{\text{зр}}$ – розмір 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 силового трансформатора; його величина за звичаєм складає 0,3...0,45.

Таким чином рівняння (3.1) дозволяє визначити величину перенапруги в процесі поновлення напруги

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

Якщо зріз струму відбувся на максимумі струму, то в цьому випадку величина перенапруги буде найбільшою. Таким чином найбільша очікувана перенапруга буде визначатись за таким виразом

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

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

Підставляючи вираз (3.4) у (3.3) отримаємо

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

Враховуючи вираз для власної частоти трансформатора в режимі холостого ходу

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

найбільша кратність перенапруги буде визначатись кратністю власної частоти трансформатора в режимі холостого ходу по відношенню до промислової частоти,

$$\kappa_{\text{н/б}} = \frac{u_{\text{в макс}}^{\text{н/б}}}{U_{\text{м}}} = \eta \frac{f_0}{f}. \quad (3.7)$$

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 вентилях розрядників, а також шунтування комутаційних апаратів резисторами з активним опором.

Основними недоліками такого підходу до визначення перенапруг є неточності, пов'язані з урахуванням активних втрат у міді і стали трансформатора в процесі відновлення напруги. Крім того, неточності пов'язані з урахуванням властивостей комутаційного апарата і обмежників перенапруг. Необхідно відзначити, що в даний час для обмеження перенапруг при вимиканні струмів холостого ходу поряд з шунтувальними резисторами широко використовуються розрядники, оксидно-цинкові варистори, що мають нелінійні характеристики. Тому розрахунок перенапруг краще здійснювати безпосереднім рішенням системи диференціальних рівнянь, які описують процес поновлення напруги безпосередньо після зрізу струму або моделювання цього процесу за допомогою програм схмотехнічного моделювання (наприклад, Electronics Workbench).

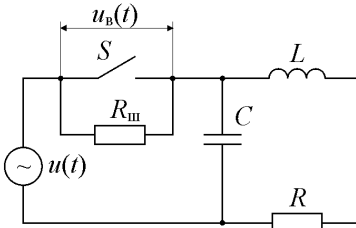


Рисунок 3.1 – Схема заміщення для розрахунку перенапруг

Схема для моделювання процесу поновлення напруги при вимиканні малих індуктивних струмів наведена на рис 3.1. Вона 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 також індуктивність L , ємність C і активний опір R , обумовлені параметрами силового трансформатора в режимі холостого ходу.

Індуктивність фази трансформатора в режимі холостого ходу визначається за такою формулою:

$$L = \frac{100\%}{I_0\%} \cdot \frac{U_n^2}{2\pi f S_n} \quad (3.8)$$

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

$I_0\%$ – 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:

$$C = \frac{C_{\phi}}{2} \quad (3.9)$$

Приведений активний опір трансформатора визначається сумарними активними втратами в міді і стали за формулою (2.5).

3.3 Завдання

3.3.1 Ознайомитися з методикою розрахунку перенапруг при вмиканні холостих трансформаторів [1,8].

3.3.2 Використовуючи можливості однієї з програм схемотехнічного моделювання (наприклад Electronics Workbench) [14–15], 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.

3.4 Методичні вказівки

3.4.1 За паспортними даними трансформатора, що надані у таблиці 3.1, розрахувати параметри схеми для моделювання процесу вмикання струму холостого ходу (див. рис. 3.1), використовуючи вирази (3.8), (3.9), (2.3), (2.5).

3.4.2. Для виконання п. 3.3.2 завдання необхідно:

а) увімкнути ПК та завантажити необхідне програмне забезпечення, наприклад Electronics Workbench;

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

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 наклеїти її у звіт з лабораторної 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 3.1 – 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

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 Які існують методи розрахунку перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів?

3.5.2 Які переваги має метод, заснований на безпосередньому рішенні системи диференційних рівнянь?

3.5.3 Які чинники впливають на величину перенапруги при вимиканні малих індуктивних струмів?

3.5.4 Які міри застосовують для зниження перенапруг при вимиканні малих індуктивних струмів?

3.5.5 Який характер має крива поновлюваної напруги при вимиканні малих індуктивних струмів?

4. ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4. ВИБІР ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИМИКАЧА

Тривалість лабораторного заняття – 4 години

4.1 Мета роботи

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

4.2 Предмет дослідження

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

У нинішній час силові високовольтні вимикачі використовуються в електричних системах напругою до 1200 кВ і вимикаємими струмами до 80–100 кА. У розподільних пристроях 110 кВ і вище знайшли використання, головним чином, повітряні і елегазові вимикачі. При цьому, спостерігається явна тенденція до витиснення повітряних вимикачів елегазовими. За оцінках більшості фахівців найближчим часом елегазові вимикачі повинні зайняти домінуючі позиції у розподільних пристроях 220 кВ і вище. Розподільні пристрої середньої напруги (до 35 кВ) у нинішній час оснащені, головним чином, маломасляними, електромагнітними, елегазовими і вакуумними вимикачами. При цьому необхідно зауважити, що сучасний світовий ринок вимикачів середньої напруги приблизно на 80% формується за рахунок вакуумних вимикачів, 20% – елегазових і 1–2% за рахунок маломасляних; причому більшість фірм припинили капіталовкладення в розробку комплектних розподільних пристроїв 6–35 кВ з маломасляними та електромагнітними вимикачами.

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

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

$$I_n \geq I_{нe/y}; \quad U_n \geq U_{нe/y},$$

де I_n , U_n – відповідно номінальний струм і номінальна напруга обраного вимикача;

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

Перевірка вимикача по стійкості при протіканні наскрізних струмів короткого замикання здійснюється у відповідності з такими співвідношеннями:

- по електродинамічній стійкості:

$$i_{e/д ст} \geq i_{уд} = \sqrt{2} \kappa_{уд} I_{п0};$$

- по термічній стійкості

$$I_{т ст} \geq I_{п0}$$

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

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

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

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

$I_{п0}$ – початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ;

$\kappa_{уд}$ – ударний коефіцієнт.

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

$$U_n \geq U_{нe/y}; \quad I_{в ном} \geq I_{п0}; \quad I_{о ном} \geq I_{пт}$$

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

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

$I_{пт}$ – діюче значення струму КЗ в момент початку розмикання дугогасильних контактів вимикача; при КЗ у віддалених точках $I_{пт} = I_{п0}$; при КЗ поблизу генераторів $I_{пт}$ істотно відрізняється від $I_{п0}$ і може бути визначено по розрахунковим кривим [2];

г) вміст аперіодичної складової струму КЗ не повинен перевищувати нормованого значення:

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

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

β_n – нормований відсотковий вміст аперіодичної складової, який визначається по нормованій кривій $\beta_n = f(t_{кз})$ де $t_{кз}$ є найменшим можливим часом з моменту початку кз до початку розмикання його дугогасильних контактів, який визначається сумою

$$t_{кз} = t_{спрв} + t_{спрпз},$$

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

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

д) крива власної ППВ даної електричної системи повинна лежати нижче нормованої огинаючої кривої, яка визначається:

- двома параметрами U_0 і t_1 при $U_n = 6-35$ кВ; або
- 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 вимикаємого струму кз до номінального струму вимикання вимикача [7].

4.3 Завдання

Вибрати ввідний Q_v і лінійний Q_l вимикачі для ділянки підстанції, схема якої надана, на рис. 4.1 і перевірити їх працездатність в режимі короткого замикання.

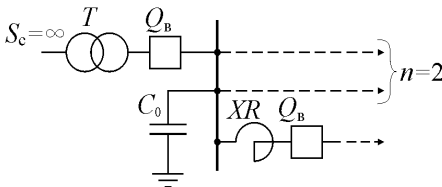


Рисунок 4.1 – Однолінійна схема ділянки підстанції

Паспорті дані електроустаткування, а також сумарна ємність електроустаткування 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.

4.4 Методичні вказівки

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

$$\sqrt{3}I_H U_H = 0,9S_H.$$

Таблиця 4.1 – Паспортні дані електроустановки

№ 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

4.4.2 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 [3,7,10–12] та записати їх основні параметри: I_H , U_H , $I_{T\text{ ст.}}$, $i_{e/d\text{ ст.}}$, $I_{0\text{ ном.}}$, $I_{B\text{ ном.}}$.

4.4.4 Визначити параметри струму кз, для чого необхідно:

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

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

в) увімкнути ПК і завантажити програму схемотехнічного моделювання;

г) за схемою заміщення побудувати схемотехнічну модель і визначити параметри струму КЗ: $I_{п0}$, $I_{пг}$, $i_{уд}$;

д) роздрукувати вихідні дані й отриману криву струму КЗ і підкласти їх у звіт по лабораторній роботі.

4.4.5 Зробити висновки про працездатність вимикачів по параметрах струму КЗ:

а) за термічною та електродинамічною стійкістю;

б) за вмістом аперіодичної складової струму КЗ;

в) за вмикальною та вимикальною спроможністю; при необхідності вибрати інші вимикачі.

4.4.6 Визначити параметри ППВ для ввідного і лінійного вимикачів, для чого необхідно:

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

б) увімкнути ПК і завантажити програму схемотехнічного моделювання;

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

4.4.7 Зробити висновки про працездатність вимикачів за параметрами ППВ. 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) вихідні дані й отримані криві, і параметри струму КЗ;

д) вихідні дані й отримані криві ППВ;

е) 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 високовольтні

вимикачі?

4.5.2 Які функції виконують високовольтні вимикачі в електроустановках?

4.5.3 За якими параметрами здійснюється вибір високовольтних вимикачів?

4.5.4 За якими параметрами здійснюється перевірка високовольтних 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 ППВ?

ЛІТЕРАТУРА

1. Электрическая часть станций и подстанций [текст] / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшккова и др.; под ред. А.А. Васильева. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 576 с.
2. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций [текст] / Б.Н. Неклепаев. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 640 с.
3. Крючков, И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования [текст] / И.П. Крючков, Н.Н. Кувшинский, Б.Н. Неклепаев. — М.: Энергия, 1978. — 456 с.
4. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [текст] / Б.Ю. Липкин — М.: Высшая школа, 1990. — 356 с.
5. Неклепаев, Б.Н. Координация и оптимизация уровней токов короткого замыкания в электрических системах [текст] / Б.Н. Неклепаев. — М.: Энергия, 1978. — 152 с.
6. Голубев, М.Л. Расчет токов КЗ в электросетях 0.4–35 кВ [текст] / М.Л. Голубев. — М.: Энергия, 1980. — 88 с.
7. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения [текст] / Н.Г. Адоньев, В.В. Афанасьев, И.Н. Бортник [и др.]; под ред. В.В. Афанасьева. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 544 с.
8. Буткевич Г.В. Дуговые процессы при коммутации электрических цепей [текст] / Г.В. Буткевич — М.: Высшая школа, 1967. — 195 с.
9. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения [текст] / под ред. И.А. Баумштейна и С.А. Бажанова. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 768 с.
10. Электротехнический справочник [текст]: в 3 т. / под ред. М.Г. Чиликина (гл. ред.) [и др.] — М.: Энергия, 1974.
11. Электротехнический справочник [текст]: в 3 т. / под ред. И.Н. Орлова (гл. ред.) и др. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
12. Акодис, М.М. Определение восстанавливающегося напряжения на контактах выключателя [текст] / М.М. Акодис, П.А. Корзун. — М.: Энергия, 1968. — 190 с.
13. Панфилов, Д.И. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях [текст]: практикум на Electronics Workbench: в 2 т. / Д.И. Панфилов, Д.С. Иванов, И.Н. Чепурин; под общ. ред. Д.И. Панфилова. — М.: ДОДЭКА, 1999. —
14. Карлащук, В.И. Электронная лаборатория на IBM PC [текст]: программа Electronics Workbench и ее применение / В.И. Карлащук. — М.: СОЛОН-Р, 2001. — 726 с.