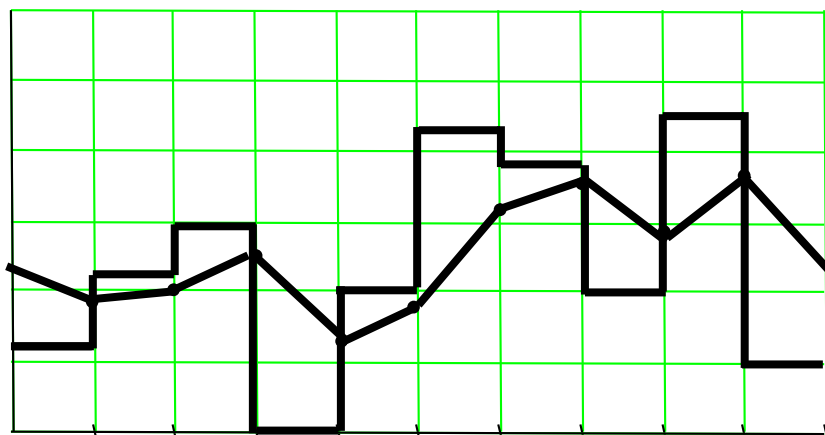


**М. Й. Бурбело, В. В. Камінський,
І. М. Романюк**

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. Й. Бурбело, В. В. Камінський, І. М. Романюк

**ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як лабораторний практикум для студентів електротехнічних спеціальностей. Протокол № 6 від 29.01.2009 р.

Вінниця ВНТУ 2009

УДК 621.311(075)
Б 91

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

Б. С. Рогальський, доктор технічних наук, професор

В. С. Костишин, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

Бурбело М. Й., Камінський В. В., Романюк І. М.

Б 91 **Електропостачання. Лабораторний практикум.** – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 76 с.

В навчальному посібнику приведені лабораторні роботи, які розроблено колективом кафедри „Електротехнічні системи електроспоживання та енергетичний менеджмент” ВНТУ. Посібник написаний у відповідності з програмою дисципліни “Електропостачання” і може бути використаний студентами електротехнічних спеціальностей вищих навчальних закладів під час проведення лабораторних занять.

УДК 621.311(075)

© М. Бурбело, В. Камінський, І. Романюк, 2009

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Лабораторна робота № 1. Дослідна побудова графіків електричних навантажень.....	5
Лабораторна робота № 2. Дослідження схем обліку електроенергії трифазних споживачів.....	10
Лабораторна робота № 3. Дослідження розрахункового навантаження для довільного графіка.....	16
Лабораторна робота № 4. Статистичний контроль відхилень напруги в розподільних мережах.....	23
Лабораторна робота № 5. Експериментальне визначення параметрів несиметрії напруг.....	34
Лабораторна робота № 6. Дослідження несинусоїдних режимів в електричних мережах з вентильним навантаженням.....	40
Лабораторна робота № 7. Дослідження однофазних замикань на землю в трифазних мережах з ізолюваною та компенсованою нейтраллю.....	45
Лабораторна робота № 8. Автоматичне керування компенсаційними установками за допомогою регулятора реактивної потужності Б-2201.....	53
Лабораторна робота № 9. Дослідження технічних характеристик високовольтних вакуумних вимикачів.....	60
Лабораторна робота № 10. Дослідження захисних характеристик плавких запобіжників та автоматичних вимикачів.....	69
Українсько-англійський словник найбільш вживаних термінів.....	74
Список використаних джерел.....	75

ВСТУП

Навчальний посібник відповідає програмі дисципліни „Електропостачання” і складається з 10 лабораторних робіт. В лабораторних роботах вказана мета, приведені короткі теоретичні відомості, схеми, порядок виконання роботи і обробки результатів експериментів та рекомендована література.

Вивчаючи теоретичні положення, студенти повинні ознайомитись з лабораторним обладнанням установок, яке в більшості випадків використовується в діючих електроустановках для забезпечення надійного електропостачання підприємств, аналізу режимів роботи систем електропостачання, обліку електроенергії та керування.

Самостійне проведення студентами лабораторних робіт можливе тільки за попередньої підготовки до виконання експериментальних робіт і вміння аналізувати та узагальнювати результати експерименту.

Проведені в процесі виконання лабораторних робіт експерименти дозволяють студентам:

- засвоїти побудову змінних графіків навантажень промислових підприємств та визначення показників, які характеризують ці графіки;
- вивчити схеми приєднання лічильників електричної енергії та вміти визначати за їх допомогою споживання кількості електроенергії;
- засвоїти поняття розрахункового навантаження та вивчити фактори, що впливають на його значення;
- ознайомитись з методами контролю відхилень, несиметрії та несинусоїдності напруг;
- вивчити особливості режимів однофазного замикання на землю в мережах з ізольованою та компенсованою нейтраллю, а також з активним опором в нейтралі;
- засвоїти загальні положення з керування компенсувальними установками;
- ознайомитись з роботою вакуумних вимикачів;
- ознайомитись з основними поняттями, які стосуються запобіжників та автоматичних вимикачів, і побудувати їх захисні характеристики.

Лабораторні роботи поставлені:

№ 1, № 2, № 4 – В. В. Камінським, № 3 – І. М. Романюком;

№ 5 – М. Й. Бурбелою, О. В. Бабенком та О. М. Кравцем;

№ 6 – М. Й. Бурбелою та В. А. Климчуком; № 7 – М. Й. Бурбелою;

№ 8 – Б. С. Рогальським, В. М. Непийводою та В. В. Вержуком;

№ 9 – О. О. Бірюковим та Ю. П. Войтюком, № 10 – М. П. Свиридовим.

Загальне редагування посібника виконав Бурбело М.Й.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ДОСЛІДНА ПОБУДОВА ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Мета роботи: вивчити методику дослідної побудови змінних графіків навантаження промислових підприємств і визначення показників, які характеризують ці графіки.

Теоретичні відомості

Режим роботи споживачів електричної енергії безперервно змінюється протягом доби, тижня, року. Змінюється і навантаження всіх елементів передавання та розподілення електроенергії. Зміну навантажень електроустановок у часі прийнято зображати графічно у вигляді графіків активних і реактивних навантажень, а також змінних, добових, місячних та річних.

Змінні та добові *графіки навантажень (load curves)* можна побудувати за показами лічильників активної та реактивної енергії, що встановлюються на лініях, які відходять від розподільних пристроїв підстанцій промислових підприємств. Для цього записують покази лічильників через певний інтервал часу (60 або 30 хвилин) та визначають середню потужність навантаження за даний інтервал.

Змінні графіки навантажень промислових підприємств характеризуються такими параметрами та коефіцієнтами [1–3]:

1. W_a, W_p – витрати активної та реактивної енергії за зміну:

$$W_a = P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots + P_n t_n, \text{ кВт}\cdot\text{год};$$

$$W_p = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots + Q_n t_n, \text{ квар}\cdot\text{год},$$

де P_1, P_2, \dots, P_n ; Q_1, Q_2, \dots, Q_n – навантаження за інтервали часу між показами лічильника; t_1, t_2, \dots, t_n – інтервали часу між вимірюваннями; n – кількість вимірювань.

2. P_c, Q_c – відповідно, середня активна і реактивна потужності навантажень за зміну:

$$P_c = \frac{W_a}{T}, \text{ кВт}; \quad Q_c = \frac{W_p}{T}, \text{ квар},$$

де T – тривалість зміни.

3. P_e, Q_e, S_e – середньоквадратичні (ефективні) значення активного, реактивного та повного навантаження:

$$P_e = \sqrt{(P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n) / \sum_{i=1}^n t_i};$$

$$Q_e = \sqrt{(Q_1^2 t_1 + Q_2^2 t_2 + \dots + Q_n^2 t_n) / \sum_{i=1}^n t_i};$$

$$S_e = \sqrt{P_{e^2} + Q_{e^2}},$$

а якщо інтервали часу між вимірюваннями однакові, то

$$P_e = \sqrt{(P_1^2 + P_2^2 + \dots + P_n^2)/n};$$

$$Q_e = \sqrt{(Q_{1^2} + Q_{2^2} + \dots + Q_{n^2})/n};$$

$$S_e = \sqrt{P_e^2 + Q_e^2}.$$

4. P_m, Q_m, S_m – максимальні значення активної, реактивної та повної потужностей навантажень, кВт, квар, кВ·А. Визначаються безпосередньо з графіків.

5. K_ϵ – коефіцієнт використання

$$K_\epsilon = \frac{P_c}{P_n},$$

де P_n – номінальна потужність електроприймачів, графік навантаження яких розглядається. Для реактивної і повної потужностей коефіцієнт використання визначається аналогічно.

6. K_m – коефіцієнт максимуму навантаження, який визначається для найбільш завантаженої зміни, відповідно, для активного та реактивного навантаження:

$$K_{ma} = \frac{P_m}{P_c}; \quad K_{mp} = \frac{Q_m}{Q_c}.$$

7. $K_{з.з.}$ – коефіцієнт заповнення графіка:

$$K_{з.з.a} = \frac{P_c}{P_m}; \quad K_{з.з.p} = \frac{Q_c}{Q_m}.$$

8. K_ϕ – коефіцієнт форми графіка:

$$K_{\phi a} = \frac{P_e}{P_c}; \quad K_{\phi p} = \frac{Q_e}{Q_c}.$$

9. Середній коефіцієнт потужності за зміну:

$$\cos \phi_c = \frac{P_c}{\sqrt{P_{c^2} + Q_{c^2}}}.$$

10. T_{ma}, T_{mp} – кількість годин використання максимуму активного і реактивного навантажень за зміну, год.:

$$T_{ma} = \frac{W_a}{P_m}; \quad T_{mp} = \frac{W_p}{Q_m}.$$

11. K_n – коефіцієнт попиту

$$K_n = \frac{P_m}{P_n}.$$

Опис установки

В лабораторній установці моделюється комірка однієї з відхідних від ГПП заводу ліній. Цією лінією забезпечується живлення одного з цехів

заводу з сумарною встановленою потужністю електричних приймачів рівною $P_H = 1610$ кВт, $Q_H = 1800$ квар. Витрата електричної енергії контролюється лічильниками активної і реактивної енергії, які встановлені в комірці лінії, що відходить від шин 10 кВ ГПП до цеху (рис. 1.1). Струмові кола лічильників під'єднані до вимірювальних трансформаторів струму з коефіцієнтом трансформації $K_{TC}=300/1$, а напругові кола – через вимірювальний трансформатор напруги з коефіцієнтом трансформації $K_{TH}=10000/100$.

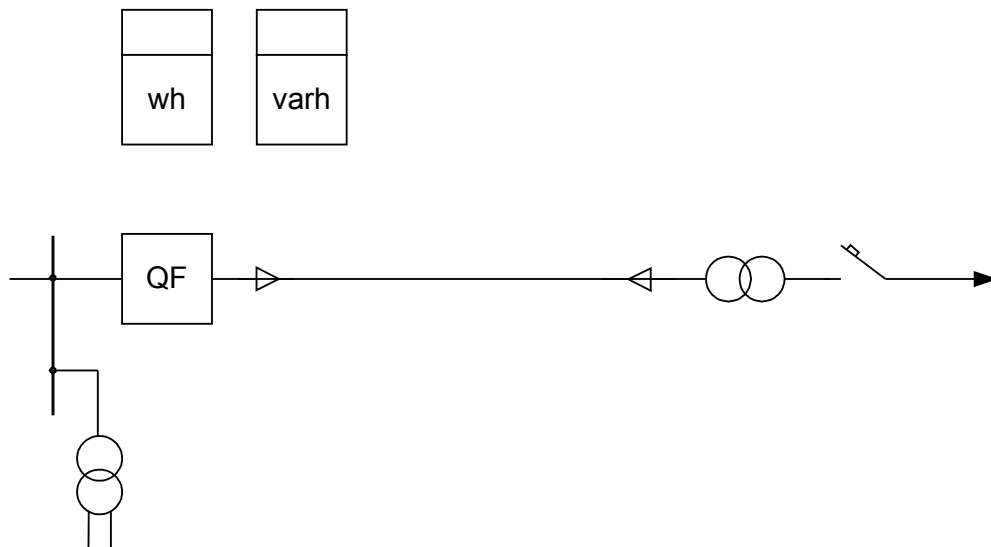


Рисунок 1.1 – Схема установки

На стенді подана мнемонічна схема установки, встановлені лічильники активної та реактивної енергії, а також реле, яке задає режим роботи електроприймачів. Встановлення часу "початок зміни" здійснюється викладачем, після цього будь-які маніпуляції забороняються.

В лабораторній установці можна здійснювати регулювання навантаження за заданою програмою, яка реалізується спеціальним пристроєм автоматики або вручну за допомогою тумблерів 1-8. В першому випадку перемикач режиму повинен бути встановлений в положення "А", а в другому – в положення "Р". В автоматичному режимі форма графіка навантаження задається викладачем шляхом встановлення стрілки реле РВ в діапазоні шкали 40–200 хв. У разі встановлення реле на відмітку "40 хвилин", в кінці зміни відбувається автоматичне вимкнення масляного вимикача QF .

Напруга на стенд подається автоматичним вимикачем, а її наявність контролюється за допомогою сигнальної лампи на стенді, яка розташована над вимикачем. Увімкнення масляного вимикача QF здійснюється дистанційно натисканням кнопки "Пуск", після цього засвічується сигнальна лампа мнемосхеми.

Записувати покази лічильників з інтервалом часу 60 або 30 хвилин, як це робиться в дійсності, в лабораторній установці не можливо. Тому

інтервал часу між записами показів лічильників приймається 10 хвилин, а при побудові графіків навантаження і в розрахунках приймається інтервал 60 хвилин.

Середня споживана потужність (активна або реактивна) за будь-який період часу визначається за формулою:

$$P=K_{TC} \cdot K_{TH} \cdot (W_i - W_{i-1}) / t,$$

де K_{TC} і K_{TH} – коефіцієнти трансформації вимірювальних трансформаторів струму та напруги; $(W_i - W_{i-1})$ – різниця показів лічильника в кінці і на початку прийнятого інтервалу часу, кВт·год і квар·год; t – інтервал часу між вимірюваннями (приймається умовно 60 хвилин).

Порядок увімкнення стенда

В автоматичному режимі роботи:

1. За допомогою внутрішнього кільця стрілка реле РВ встановлюється на одну з поділок в діапазоні шкали реле 40 – 200 хвилин. Положення стрілки фіксується легким поворотом зовнішнього кільця за годинниковою стрілкою. Маніпуляція з реле виконується **тільки викладачем**.
 2. Перемикач режиму виставляється в положення “А”.
 3. Вмикається автомат стенда (при цьому засвічується сигнальна лампа).
 4. Знімаються початкові покази лічильників активної і реактивної енергії.
 5. Натисканням кнопки “Пуск” вмикається масляний вимикач, який забезпечує живлення лінії.
- Вимкнення стенда виконується в зворотному порядку.

За ручної зміни режиму:

1. Стрілка реле РВ виводиться в “мертву зону” за відмітку 200 хвилин.
2. Перемикач режимів виставляється в положення “Р”.
3. Знімаються початкові покази лічильників і вмикається масляний вимикач МВ.
4. За спеціальною програмою, через вказаний викладачем інтервал часу, вмикаються тумблери 1-8.

Завдання і методика виконання роботи

1. Ознайомитись з лабораторною (роботою) установкою і порядком проведення вимірювань.
2. Зняти покази лічильників активної та реактивної енергії за зміну і занести їх в таблицю. Тривалість зміни прийняти 8 годин (тобто зробити 8 вимірювань через кожні 10 хвилин).
3. Побудувати змінні графіки активної та реактивної потужностей і визначити:

- максимум активної та реактивної потужностей – P_m, Q_m ;
- витрату активної та реактивної енергії за зміну – W_a, W_p ;
- середні навантаження P_c, Q_c ;
- коефіцієнти використання за активним і реактивним навантаженнями $K_{в.а}, K_{в.р}$;
- коефіцієнт заповнення графіка активної і реактивної потужностей $K_{з.з.а}, K_{з.з.р}$;
- коефіцієнт максимуму для активного і реактивного графіків $K_{ма}, K_{мр}$;
- середньоквадратичну (ефективну) активну і реактивну потужності добових графіків P_e, Q_e, S_e ;
- коефіцієнт форми активного і реактивного графіків навантажень $K_{фа}, K_{фр}$;
- середній коефіцієнт потужності за зміну $\cos\phi_c$;
- кількість годин використання максимумів активного і реактивного навантажень за зміну $T_{ма}, T_{мр}$;
- коефіцієнт попиту K_n .

Зміст звіту

Звіт повинен містити:

1. Схему установки, яка моделюється.
2. Таблицю із записами показів лічильників активної і реактивної енергії за всі 8 годин роботи цеху.
3. Графіки активного і реактивного навантажень для заданої зміни.
4. Визначення всіх необхідних показників змінних графіків.
5. Висновки про характер графіків навантажень з урахуванням одержаних коефіцієнтів.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ СХЕМ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТРИФАЗНИХ СПОЖИВАЧІВ

Мета роботи: вивчення схем приєднання лічильників електричної енергії (*electricity meters*) до трифазного кола і визначення споживання електричної енергії.

Теоретичні відомості

У трифазних електричних колах електроенергію вимірюють трифазними лічильниками індукційної чи електронної системи.

Індукційні лічильники мають дві або три обертових електромагнітних системи й один, два чи три диски, на які впливають ці системи. У трипровідних мережах застосовують переважно лічильники з двома обертовими системами і з одним чи двома алюмінієвими дисками, насадженими на загальну вісь.

Обертвий момент, створюваний електромагнітними системами лічильників, пропорційний активній потужності трифазного споживача. Наприклад, для двоелементного лічильника:

$$P_1 = \operatorname{Re}(\dot{U}_{AB} \dot{I}_A) = \operatorname{Re}(\dot{U}_A - \dot{U}_B) \dot{I}_A = U_A I_A \cos \phi_A - U_B I_A \cos(120 - \phi_A);$$
$$P_2 = \operatorname{Re}(\dot{U}_{CB} \dot{I}_C) = \operatorname{Re}(\dot{U}_C - \dot{U}_B) \dot{I}_C = U_C I_C \cos \phi_C - U_B I_C \cos(120 - \phi_C).$$

Сумарний обертвий момент, що діє на диск двоелементного лічильника типу "И", пропорційний потужності трифазного споживача:

$$P = P_1 + P_2 = U_A I_A \cos \phi_A + U_C I_C \cos \phi_C + U_B [-I_A \cos(120 - \phi_A) - I_C \cos(120 - \phi_C)] = \dot{U}_A I_A \cos \phi_A + U_B I_B \cos \phi_B + U_C I_C \cos \phi_C = P_A + P_B + P_C.$$

Електронні лічильники призначені для вимірювання витрати активної або активної і реактивної електричної енергії прямого і зворотного потоків.

До складу лічильника Ф443АР, використовуваного в лабораторній роботі, входять такі блоки: 1) вхідні трансформатори струму T ; 2) модулятори M ; 3) перетворювачі "струм-частота" каналів активної P_A і реактивної P_P енергії; 4) лічильники імпульсів $ЛІ$; 5) генератор тактових імпульсів $ГТІ$; 6) блок індикації $БІ$; 7) блок температурних сенсорів $БТД$; 8) блок живлення $БЖ$.

До складу лічильника Ф443А не входять перетворювач "струм-частота" P_P і лічильник імпульсів $ЛІ$ реактивного каналу, а в блоці індикації та у блоці телеметричних сенсорів встановлені тільки елементи, необхідні для функціонування каналу активної енергії.

Вхідні трансформатори струму T перетворюють струм трьох фаз у напруги, які пропорційні струмам. Модулятор M забезпечує перемножування миттєвих значень двох напруг методом подвійної модуляції параметрів імпульсу і виробляє послідовність імпульсів струму. Середні значення струмів I_{Ac} , I_{Bc} , I_{Cc} такої послідовності імпульсів на виході кожного модулятора пропорційні активним потужностям P_A , P_B , P_C відповідної фази вимірюваного навантаження:

$$I_{Ac} = \frac{K}{T} \int_0^T u_A i_A dt = KP_A ; I_{Bc} = \frac{K}{T} \int_0^T u_B i_B dt = KP_B ; I_{Cc} = \frac{K}{T} \int_0^T u_C i_C dt = KP_C ,$$

де T – період вхідної напруги; u_A , u_B , u_C – напруги фаз у вимірюваному колі; I_A , I_B , I_C – струми фаз у вимірюваному навантаженні; K – загальний коефіцієнт перетворення модулятора і трансформатора.

Модулятори M виробляють також послідовність імпульсів струму, амплітуда яких пропорційна лінійній напрузі двох інших фаз. Середні значення струмів I'_{Ac} , I'_{Bc} , I'_{Cc} такої послідовності імпульсів на виході кожного модулятора пропорційні реактивним потужностям Q_A , Q_B , Q_C відповідної фази вимірюваного навантаження:

$$I'_{Ac} = \frac{K}{T} \int_0^T u_{BC} i_A dt = KQ_A ;$$

$$I'_{Bc} = \frac{K}{T} \int_0^T u_{CA} i_B dt = KQ_B ;$$

$$I'_{Cc} = \frac{K}{T} \int_0^T u_{AB} i_C dt = KQ_C ,$$

u_{AC} , u_{BC} , u_{CA} – миттєві значення лінійних напруг.

Перетворювачі "струм – частота" Pa , Pp інтегрують суму вихідних струмів модуляторів з перетворенням інтеграла в послідовність імпульсів, кількість яких (n) зв'язане з витратою (генерацією) енергії (W) у контрольованому колі залежністю:

$$n = f_0 t = \alpha W ;$$

де $f_0 = 5000$ імп/с – центральна частота, тобто частота проходження вихідних імпульсів перетворювача при нульовій потужності в контрольованому колі;

t – час вимірювання;

α – передатне число перетворювача (для виконання лічильника 3 x 1A $\alpha = 50000$ імп/квт·год; для виконання лічильника 3 x 5A $\alpha = 10000$ імп/квт·год).

Знак "плюс" відповідає витраті енергії, знак "мінус" – зворотному потоку (генерації) енергії.

Лічильники імпульсів *ЛІ* виробляють імпульс керування сенсорами прямого і зворотного потоку енергії, світловими індикаторами блока індикації *БІ*.

Генератор тактових імпульсів *ГТІ* виробляє тактові імпульси й імпульси опорної частоти.

Блок індикації *БІ* забезпечує підсумовування імпульсів, які надходять від лічильника імпульсів *ЛІ*, і візуальну індикацію витрати й генерації енергії.

Блок *БТД* містить телеметричні сенсори, які забезпечують комутацію постійного струму в колах зв'язку з приймачем інформації у відповідності з вихідними сигналами лічильника імпульсів.

Блок живлення *БЖ* виробляє необхідні напруги (від 4 до 17 В) для живлення аналогової частини схеми лічильника, дискретних мікросхем, світлодіодів блока індикації, телеметричних сенсорів і крокових двигунів підсумовувальних механізмів.

Типові схеми приєднання трифазних лічильників приводяться в технічному описі та інструкції з експлуатації лічильників, а також у спеціальній і довідковій літературі. Схеми приєднання лічильників, установлених на стенді, наведені на рис. 2.1.

Лічильники прямого увімкнення забезпечують покази в кВт·год і квар·год. Для універсальних трансформаторних лічильників, призначених для увімкнення через трансформатори струму і напруги з коефіцієнтами трансформації, відповідно, K_C і K_H , покази відлікових механізмів домножають на коефіцієнт

$$K = K_C \cdot K_H . \quad (2.1)$$

В лічильниках, призначених для приєднання через вимірювальні трансформатори, з визначеними наперед заданими коефіцієнтами, зазначеними в паспорті лічильника, відлікові механізми показують витрату електричної енергії безпосередньо в кВт·год. і квар·год. При цьому необхідно мати на увазі, що лічильник повинен бути увімкнений саме так, як вимагає його паспорт.

Якщо лічильник призначений для роботи з вимірювальними трансформаторами, які мають коефіцієнт трансформації K_{CB} і K_{HB} , приєднаний через вимірювальні трансформатори з іншими коефіцієнтами трансформації K_C і K_H , то для отримання витрат електроенергії в кВт·год. і квар·год. покази лічильного механізму необхідно помножити на коефіцієнт

$$K = \frac{K_C K_H}{K_{CB} K_{HB}} . \quad (2.2)$$

В деяких випадках для отримання витрат електроенергії в кВт·год. і квар·год. покази лічильного механізму необхідно помножити на коефіцієнт лічильного механізму “*В*”, який знаходиться справа від останнього знака лічильного пристрою. Якщо лічильник приєднаний за схемою, яка

відрізняється від паспортної, то покази лічильного механізму множать на коефіцієнт схеми “ a ”, значення якого залежить від конкретної схеми приєднання лічильника. Наприклад, при вимірюванні реактивної енергії активним лічильником, коефіцієнт схеми $a = \sqrt{3}$.

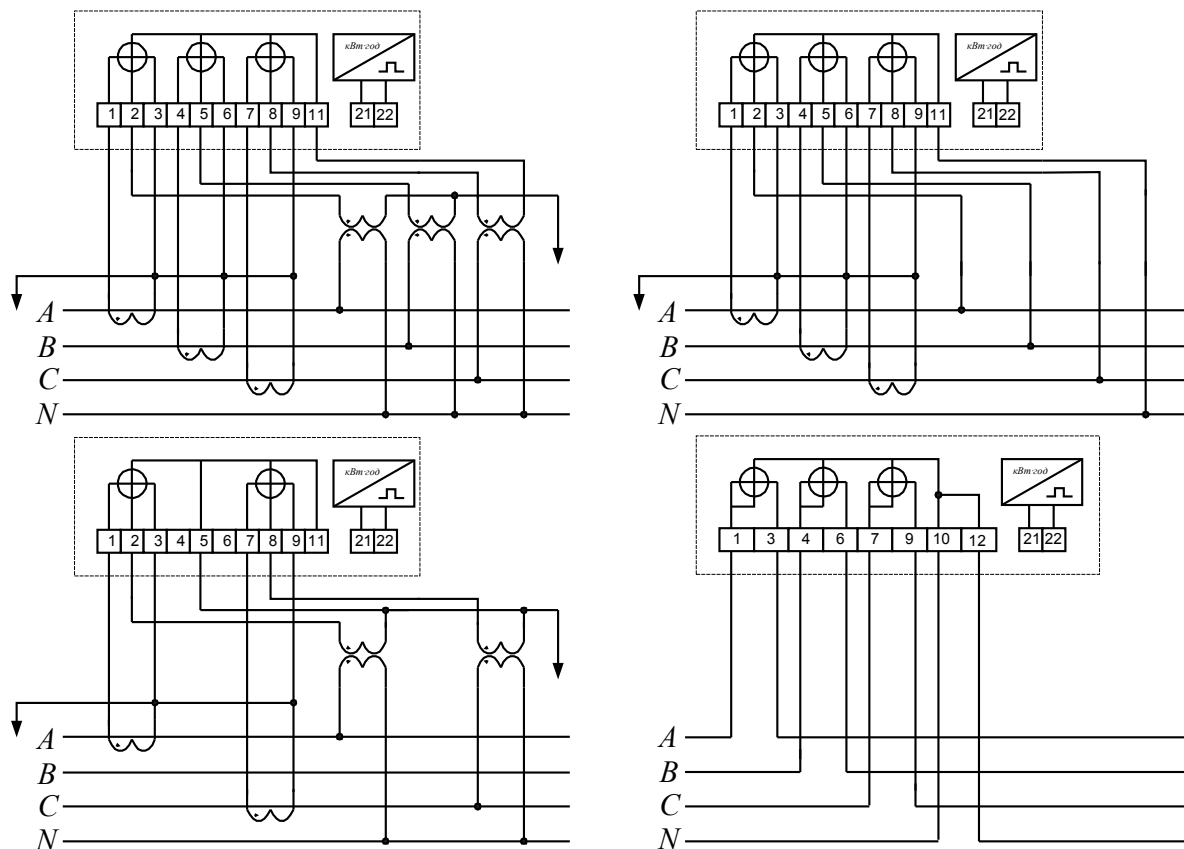


Рисунок 2.1 – Схеми приєднання лічильників

В загальному випадку витрати електроенергії визначають за виразом:

$$W = N \cdot a \cdot \varphi \cdot K, \text{ кВт}\cdot\text{год. або квар}\cdot\text{год.}, \quad (2.3)$$

де N – різниця показів лічильника за інтервал вимірювання.

Коефіцієнт K визначається за формулами (2.1) – (2.2).

Опис установки

Виконана на стенді схема живлення трифазного навантаження містить:

- фазорегулятор (ΦP) для зсуву фази напруги, яка подається на лічильники;
- трансформатори струму (з коефіцієнтом трансформації 20/5) і напруги (з коефіцієнтом трансформації 380/100) для приєднання лічильників;
- фазометр для визначення кута зсуву фаз між струмом і напругою.

Схема дозволяє за допомогою фазорегулятора (ΦP) змінювати кут зсуву фаз між струмом і напругою на лічильниках у будь-яких межах та

імітувати в такий спосіб активно-індуктивне й активно-ємнісне навантаження, а також ефект генерації активної потужності.

На стенді використовуються лічильники різних типів і систем. Є трансформаторний лічильник, універсальний трансформаторний і лічильники безпосереднього увімкнення індукційної системи, а також електронний трансформаторний універсальний лічильник Ф443АР.

Трансформаторні лічильники вмикаються у відповідності зі схемами (рис. 2.1). Умовні позначення, прийняті на стенді, відповідають позначенням, прийнятим на схемах, і означають:

а) на вертикальній панелі:

I_A^* , I_A ; I_B^* , I_B ; I_C^* , I_C – відповідно, початок і кінець струмових обмоток лічильника для фаз "А", "В" і "С";

A , B , C – виводи відповідних напругових обмоток лічильників безпосереднього увімкнення;

a , b , c – виводи відповідних напругових обмоток трансформаторних лічильників;

б) на похилій панелі:

N_{1A} , N_{2A} , N_{1C} , N_{2C} – відповідно, початок і кінець вторинних обмоток трансформатора струму, встановленого у фазах "А", "С";

A , B , C , O – виводи вторинної напруги 380/220В фазорегулятора ;

a , b , c – виводи вторинної напруги 100В трансформатора напруги;

ΦP – рукоятка обертання ротора фазорегулятора.

Напруга, яка подається на відповідні обмотки трансформаторних лічильників, трансформується у вимірювальному трансформаторі напруги з Y на Δ , а кут між струмом та напругою на лічильниках на 30 електричних градусів перевищує кут, який знімається зі шкали фазометра. Це необхідно враховувати, виставляючи визначений кут зсуву фаз між струмом і напругою на трансформаторних лічильниках.

Наприклад, щоб установити тільки реактивне навантаження, на фазометрі необхідно виставити кут 60° . Тоді на лічильниках кут між струмом і напругою становитиме $60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$.

Очевидно, що всі ці міркування не відносяться до лічильників безпосереднього увімкнення, обмотки яких приєднуються безпосередньо після фазорегулятора, крім трансформатора напруги.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з конструкцією стенда.
2. Під'єднати пари лічильників індукційної системи у відповідності зі схемою, що зображена на рис. 2.2.
3. Переконатися в правильній роботі лічильників при встановленні за фазометром (з урахуванням 30° зсуву напруги на лічильниках) реактивного навантаження. Зафіксувати і пояснити роботу лічильників за інших кутів між струмом і напругою, що знаходяться в різних квадрантах.

4. Виставити, заданий викладачем, кут між струмом і напругою та виміряти 20-30-хвилинну витрату електроенергії.
5. Приєднати електронний лічильник і протягом такого ж, як у першому випадку, проміжку часу вимірювання та куті між струмом і напругою, зняти покази витрати електроенергії.
6. За результатами вимірювань перевірити витрати активної і реактивної енергії, визначити похибки індукційних лічильників.

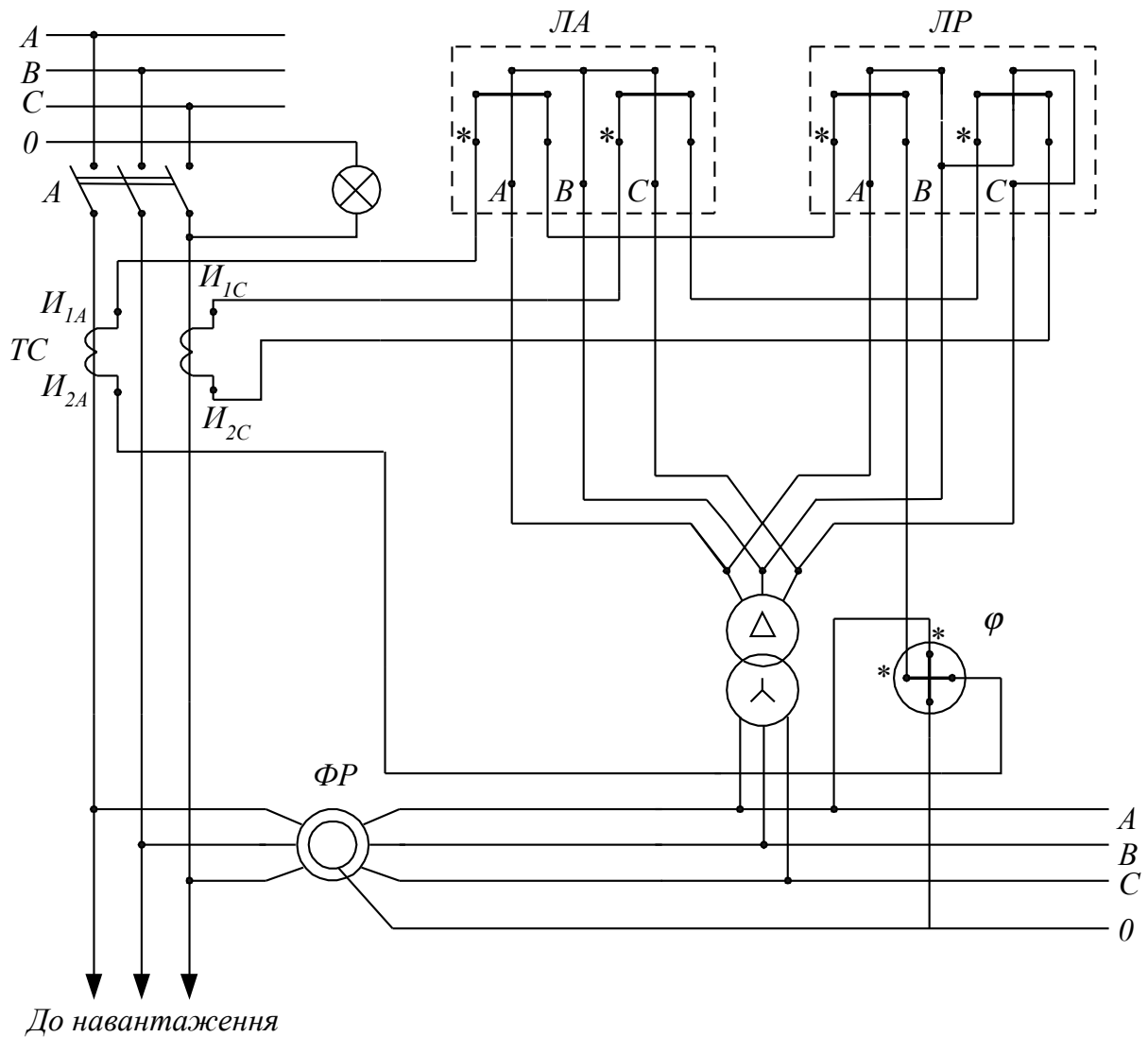


Рисунок 2.2 – Схема лабораторної установки

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗРАХУНКОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДЛЯ ДОВІЛЬНОГО ГРАФІКА

Мета роботи: засвоїти поняття *розрахункового навантаження* (*assumed load*), вивчити фактори, що впливають на його значення, оволодіти основними методами визначення розрахункового навантаження для нерівномірних графіків.

Теоретичні відомості

За незмінного навантаження, коли струм не перевищує допустимого струму провідника $I_{доп}$, температура провідника менша від тривало допустимої температури провідника $\theta_{доп}$. Тривало допустима температура $\theta_{доп}$ для проводів, шнурів і кабелів з гумовою ізоляцією становить 55–65°С, пластмасовою ізоляцією – 70°С, а для кабелів з паперовою ізоляцією до 1 кВ – 80°С; 6 кВ – 65°С; 10 кВ – 60°С і до 35 кВ – 50°С. При визначенні розрахункового навантаження з нерівномірним графіком необхідно знати допустиму температуру жили при короткотривалому перевантаженні $\theta_{м.доп}$. Короткочасно допустима температура $\theta_{м.доп}$ для проводів, шнурів та кабелів з гумовою ізоляцією становить 100–110°С, пластмасовою ізоляцією – 80–90°С, а для кабелів з паперовою ізоляцією до 1 кВ – 125°С; 6 кВ – 100°С; 10 кВ – 90°С. Для кожного провідника з певним поперечним перерізом, типом ізоляції та видом прокладання, в ПУЕ наведені значення тривало допустимого струму $I_{доп}$, визначені з умови нагрівання струмопровідної жили незмінним за часом струмом.

Для змінного графіка навантаження $I(t)$ вибір провідника потрібно проводити за усередненим на певному інтервалі часу струмом, який еквівалентний за нагрівом струму з незмінним діючим значенням I_{p1} або I_{p2} , які відповідають двом різним ефектам нагрівання провідника: максимальній температурі та тепловому зносу ізоляції.

Звідси впливає два означення розрахункового навантаження:

1. I_{p1} – розрахункове максимальне навантаження – незмінне в часі навантаження, яке викликає в провіднику такий же максимальний перегрів відносно температури навколишнього середовища, що й задане змінне навантаження $I(t)$.
2. I_{p2} – розрахункове навантаження за тепловим зносом ізоляції – незмінне в часі навантаження, яке викликає в провіднику такий самий знос ізоляції, як і змінне навантаження $I(t)$.

Розрахункові навантаження I_{p1} і I_{p2} повністю визначаються графіком $I(t)$.

Перегрів трижильного провідника відносно температури навколишнього середовища описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$C \frac{d\vartheta}{dt} + A\vartheta = 3I^2 R,$$

де C – теплоємність проводу або кабелю; A – коефіцієнт тепловіддачі, який враховує сумарну віддачу тепла в навколишнє середовище через теплопровідність, конвекцію і випромінювання; R – опір однієї жили проводу або кабелю.

Зростання опору під час нагрівання провідника визначається за виразом: $R=R_0(1+\alpha \vartheta)$, де R_0 – опір однієї жили проводу або кабелю при 20°C ; $\alpha \approx 0,0039$ – температурний коефіцієнт опору.

Прийmemo $I=I_{\text{дон.}}$; $\vartheta=\vartheta_{\text{дон.}}$; $R=R_{\text{дон.}}$. Тоді значення

$$A = \frac{3I_{\text{дон.}}^2}{\vartheta_{\text{дон.}}} R_{\text{дон.}}$$

Підставимо значення A в останнє рівняння, звідки отримаємо вираз для сталої часу нагрівання провідника:

$$T_0 = \frac{C}{A} = \frac{C\vartheta_{\text{дон.}}}{3I_{\text{дон.}}^2 R_{\text{дон.}}}$$

Для визначення розрахункового струму I_{p1} за даним графіком $I(t)$ зручно замінити температуру перегріву ϑ прямо пропорційною допоміжною змінною z за формулою:

$$\vartheta = z \frac{\vartheta_{\text{дон.}}}{I_{\text{дон.}}^2}$$

Тоді диференціальне рівняння нагріву провідників без урахування і з урахуванням температурного коефіцієнта опору, відповідно, набуде вигляду:

$$T_0 \frac{dz_0}{dt} + z_0 = I^2; \quad (3.1)$$

$$T_0 \frac{dz_1}{dt} + z_1 = \frac{R(z_1)}{R_{\text{дон.}}} I^2. \quad (3.2)$$

В рівнянні (3.1) лише T_0 залежить від площі поперечного перерізу провідника, тоді, як в рівняння (3.2) входить ще й тривало допустимий, за температурою нагрівання, струм $I_{\text{дон.}}$, оскільки $z_1 = \vartheta \frac{I_{\text{дон.}}^2}{\vartheta_{\text{дон.}}}$, який також залежить від площі поперечного перерізу провідника.

Дослідження показали, що останні рівняння можуть бути використані не тільки для наближеного визначення перегріву заданого провідника, але й для визначення з достатньою точністю розрахункових струмів I_{p1} і I_{p2} за заданим графіком навантаження $I(t)$.

На рис. 3.1 показано графік навантаження та інтегральну криву нагріву, яку обчислено за спрощеною формулою (3.1) для кабелю АСБ 3×50.

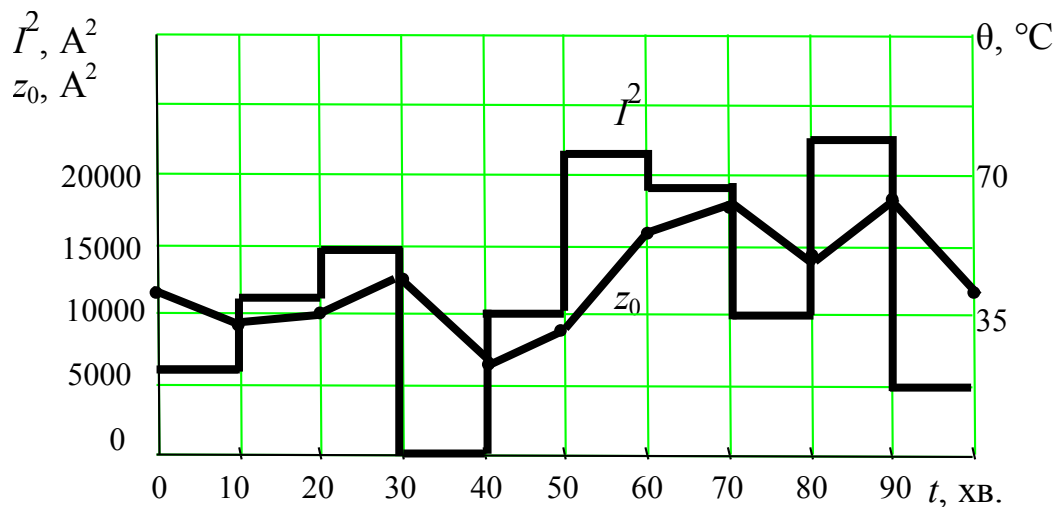


Рисунок 3.1 – Визначення розрахункового навантаження

Звернувшись спочатку до рівняння (3.1), позначимо через z_{0M} найбільшу ординату його інтеграла $z_0(t)$, тоді наближене значення ϑ_{0M} найбільшого перегріву буде $\vartheta_{0M} = z_{0M} \frac{\vartheta_{дон.}}{I_{дон.}^2}$.

За означенням розрахункового струму I_{pl} ми повинні отримати ту ж найбільшу ординату z_{0M} , що і при заданому графіку $I(t)$. Отже,

$$z_{0M} = (I_{pl}^{(0)})^2, \text{ звідки } I_{pl}^{(0)} = \sqrt{z_{0M}}. \quad (3.3)$$

Так само, коли z_{1M} є найбільшою ординатою інтеграла $z_1(t)$ рівняння (3.2), підстановка в його вираз $I(t) = I_{pl}$ після перетворень приведе до такої формули:

$$I_{pl}^{(1)} = \sqrt{\frac{(1 + \alpha \vartheta_{дон.}) z_{1M}}{1 + \alpha \vartheta_{дон.} \frac{z_{1M}}{I_{дон.}^2}}}. \quad (3.4)$$

Значення z , що розраховані за наближеною (3.1) та точною (3.2) формулами для кабелю АСБ 3×50, занесені в табл. 3.1. Аналогічний розрахунок z за точною формулою виконано також для кабелю АСБ 3×25 і результати розрахунку також занесено в табл. 3.1 [1].

Таблиця 3.1 – Результати інтервальних розрахунків

Δt	Кабель АСБ 3×50 (наближ. розрах.)		Кабель АСБ 3×50 (точний розрах.)		Кабель АСБ 3×25 (точний розрах.)	
	$z_0, 10^4$	ϑ_0 ($^{\circ}C$)	$z_1, 10^4$	ϑ_1 ($^{\circ}C$)	$z_1, 10^4$	ϑ_1 ($^{\circ}C$)

0	1.225	46.79	1.225	46.79	0.84	105.3
10	0.891	34.03	0.844	32.23	0.56	69.26
20	0.932	35.59	0.8816	33.67	0.64	80.87
30	1.128	43.08	1.0758	41.09	0.88	109.7
40	0.7	26.73	0.6033	23.04	0.42	53.21
50	0.984	37.58	0.9034	34.5	0.74	91.95
60	1.577	60.23	1.6327	62.36	1.56	195.25
70	1.718	65.61	1.826	69.74	1.83	228.6
80	1.446	55.22	1.4728	56.25	1.4	175.2
90	1.751	66.87	1.844	70.43	1.87	233.7
100	1.182	45.14	1.144	43.7	1.03	128.5

Проаналізувавши залежності $z_0(t)$ і $z_1(t)$, можна зробити висновок, що розрахункові значення струму знаходяться на дев'ятому інтервалі, де перегрів кабелю найбільший.

Визначимо розрахункові струми з наведеного графіка для кабелю АСБ 3×50 за наближеною та точною формулами, відповідно, (3.3) і (3.4):

$$I_{pl}^{(0)} \approx \sqrt{1,751 \cdot 10^4} = 132 \text{ А}; \quad I_{pl}^{(1)} = \sqrt{1,844 \cdot 10^4} = 136 \text{ А}.$$

У даному випадку наближена формула занижує розрахунковий струм на 3 %. Для кабелю АСБ 3×25 розрахунковий струм 136 А, при тривало допустимому 80 А, не допустимий, що підтверджує температура перегріву 233,7°.

Для оцінки розрахункового максимального навантаження I_{pl} можна використати принцип максимуму середнього навантаження, згідно з яким розрахункове навантаження за максимальною температурою визначається як найбільше усереднене на інтервалі $3T_0$ навантаження:

$$I_{pl} = \max_t I_{3T_0}(t) = \frac{1}{3T_0} \int_{t-3T_0}^t I(t) dt .$$

Дійсно, проаналізувавши графіки навантажень, можна помітити, що найбільше усереднене на інтервалі 30 хвилин (постійна часу нагріву кабелю перерізом 50 мм² становить 12 хвилин) навантаження було на інтервалі часу 60–90 хвилин. І це значення $I_{pl} \approx 136 \text{ А}$.

Конструктивне виконання лабораторної установки

Схема лабораторної установки наведена на рис. 3.2. Лабораторний автотрансформатор Т-1 живить понижувальний трансформатор Т-2, що дозволяє отримувати струм до 150 А. На лабораторному стенді передбачена можливість дослідження п'яти зразків проводів та кабелів, якими можна контролювати температуру провідника за допомогою бусинкового термосенсора.

Для вимірювання температури провідника, визначається опір термосенсора, а за перевідним графіком (рис. 3.3), що зображений на лабораторному стенді, визначається температура провідника. Омметр має

рівномірну шкалу і може вимірювати опори в семи діапазонах від 1 Ом до 100 МОм. При розширенні діапазонів в 2 і 5 разів розширюється діапазон вимірювань до 500 МОм. Для вимірювання струмів амперметр ввімкнено через лабораторний трансформатор струму ТА з максимальним струмом 50 А. Ввімкнену лінію сигналізує на стенді зелений світлодіод.

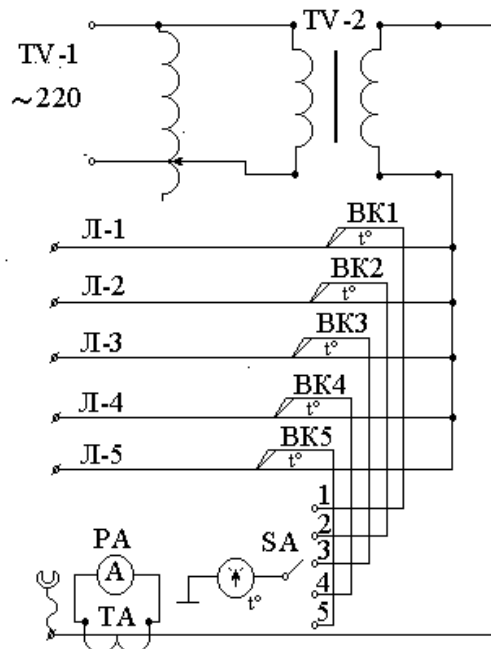


Рисунок 3.2 – Схема лабораторної установки

Завдання на дослідження

1. Для вказаного викладачем зразка провідника визначити сталу часу нагрівання та гранично допустиму температуру.
2. Побудувати графік навантаження в іменованих одиницях для заданого зразка провідника за графіком, вказаним викладачем, поданим у відносно допустимих значеннях струму.
3. Пропустити через вказаний зразок струм за побудованим графіком.
4. Для кожної сходинки графіка зафіксувати температуру провідника в кінці кожного інтервалу.
5. Для кожної сходинки визначити перегрівання провідника.
6. За попередньо наведеними прикладами визначити теоретичне значення допустимого струму для вказаного графіка за максимальною температурою.
7. За отриманими в досліді значеннями перегрівання визначити дійсний розрахунковий струм для заданого графіка.
8. Визначити кратність перегріву провідника.
9. Проаналізувати отримані дані.

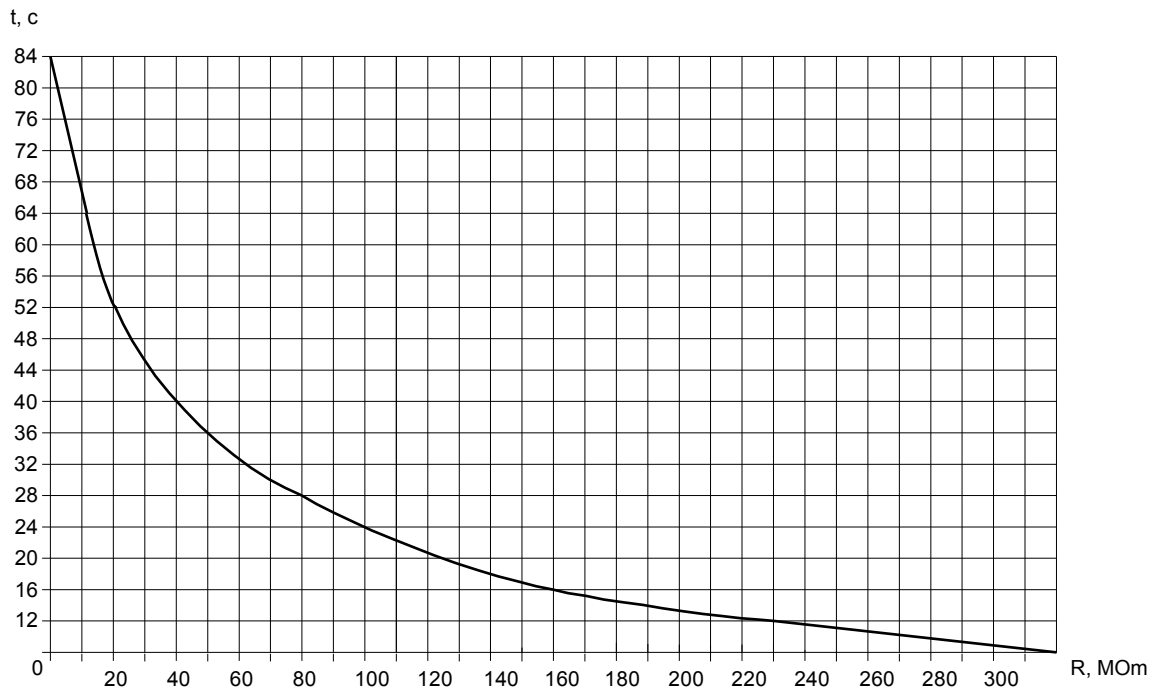


Рисунок 3.3 – Графік залежності температури від опору

Таблиця 3.3 – Варіанти змінних графіків навантаження ($I_{\text{доп}}^*$)

$t, (\text{хв.})$	№ варіанта									
№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	0,49	0,35	0,4	0,8	0,5	0,7	0,5	0,7	0,6	0,65
20	0,833	0,4	0,7	0,9	0,6	1,2	0,7	0,75	0,4	0,4
30	1	0,45	0,9	1,2	0,3	1	0,6	0,8	0,8	0,8
40	0	0,6	1	0,4	0,7	0,3	0,5	0,85	1,2	0,9
50	1	0,7	1,25	0,5	0,5	0,7	0,4	0,9	0,9	1
60	1,33	0,9	0,8	0,8	0,8	0,45	0,9	1	0,3	1,2
70	1,158	1,3	1,25	0,6	1	0,9	1,2	1,1	0,4	0,8
80	0,83	0,8	0,6	0,5	0,95	0,8	0,7	0,8	0,5	1
90	1,25	0,7	0,5	0,4	0,6	0,7	1	0,7	0,4	0,4
100	0,416	0,4	0,4	0,3	0,4	0,6	0,6	0,6	0,3	0,6

Порядок виконання роботи

1. Отримати від викладача завдання на роботу (номер лінії згідно зі схемою, значення граничного струму та варіант графіка).
2. Виставити значення гранично допустимого струму для вказаної лінії, пам'ятаючи, що амперметр під'єднаний через трансформатор струму (обов'язково в присутності викладача).
3. Протягом 30 – 40 хвилин через кожні дві хвилини знімати покази температури провідника і впевнитись, що вона є тривало допустимою?
4. Побудувати графік навантаження, помноживши відносно допустимий струм кожної сходинки на допустимий струм провідника.

5. Пропустити струм через лінію відповідно до побудованого графіка і фіксувати температуру провідника у кожній сходинці через кожні дві хвилини.

Вимоги до оформлення звіту

Звіт повинен містити: мету роботи, завдання на дослідження, порядок виконання роботи, побудований графік навантаження, розрахунки гранично допустимих значень струму за піком температури та за зносом ізоляції одним із способів, а також розрахунки гранично-допустимих струмів через отримані температури перегрівів для заданого графіка, висновки по роботі.

Контрольні запитання

1. Дати визначення розрахункового навантаження.
2. Що таке розрахункове навантаження за максимальною температурою та за зносом ізоляції?
3. Що таке тривало допустима та максимально допустима температура?
4. Записати рівняння перегрівання провідника без врахування і з врахуванням зміни опору.
5. Дати визначення сталої нагріву провідника і привести фактори, які впливають на неї.
6. Розказати принцип роботи лабораторної установки.
7. Привести формулу визначення розрахункового навантаження для змінного графіка за наближеним методом.
8. Проаналізувати як зміниться розрахункове навантаження при збільшенні нерівномірності форми графіка.
9. Чи зміниться розрахункове навантаження для одного і того ж графіка при прокладанні кабелю в повітрі і в землі? Якщо так, вказати причини.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

СТАТИСТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ВІДХИЛЕНЬ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Мета роботи: навчитися за допомогою приладу САКН-1 контролювати допустимість *відхилень напруги (voltage deviation)* в розподільних мережах споживачів електроенергії; проводити статистичну обробку результатів вимірювань; приймати обґрунтовані рішення щодо необхідності додаткових засобів регулювання напруги.

Теоретичні відомості

Аналізатор якості напруги типу САКН-1 є переносним напівпровідниковим пристроєм з дискретною цифровою індикацією, який призначений для отримання гістограми відхилень напруги в електричних мережах промислових, сільських та комунально-побутових споживачів.

Увесь контрольований діапазон відхилень напруги поділений на 8 інтервалів. Значення меж інтервалів вибираються штекерами на матриці “границі інтервалів”.

Прилад САКН-1 має силові і вимірювальні кола, які у робочому стані повинні бути увімкнені у мережу. Конструкцією передбачено як сумісне, так і роздільне живлення вимірювальних і силових кіл приладу. Під час виконання лабораторної роботи доцільно здійснювати роздільне живлення. У цьому випадку тумблер “живлення” повинен знаходитися в положенні “220”.

Місце встановлення приладу в електричній мережі залежить від мети вимірювань. Для оцінки якості напруги на затискачах електроприймачів прилад повинен під’єднуватись безпосередньо до затискачів останніх. Контролювання правильності регулювання напруги в розподільній мережі необхідно проводити на низьковольтних шинах ТП.

Принцип роботи приладу САКН-1 базується на методі моментних спостережень. Через інтервал часу, виставлений за допомогою перемикача “час”, до мережі під’єднуються вимірювальні кола приладу і фіксують рівень напруги в мережі в цей момент. Подається імпульс на спрацювання цифрового індикатора (лічильника), у діапазон чутливості якого входить зафіксований рівень напруги. Значення на відрахунковому механізмі цифрового індикатора змінюється на одиницю. Через виставлений інтервал часу цикл роботи приладу повторюється.

Різниця показів кожного лічильника до і після експерименту буде дорівнювати кількості “попадань” напруги в діапазон вимірювань даного лічильника, виставленого штекерами на матриці “границі інтервалів”.

Накопичена лічильниками інформація дозволяє побудувати гістограму частот відхилень напруги, визначити ймовірнісні характерис-

тики цих відхилень, перевірити гіпотезу про можливий закон розподілу ймовірностей даного показника якості напруги, визначити ймовірність виходу напруги за допустимі межі і зробити висновок про відповідність відхилень напруги вимогам ГОСТ 13109-97, а також про необхідність застосування спеціальних засобів регулювання напруги.

Опис лабораторної установки

В лабораторній установці моделюються випадкові зміни напруги на шинах 0,38 кВ цехової ТП. Напруга змінюється за законами, що є близькими до законів зміни напруги в промислових системах електропостачання.

За фазну номінальну напругу в лабораторній установці прийнята напруга 100 В. Це дає можливість легко виражати відхилення напруги у відсотках від номінального (один вольт відхилення напруги відповідає одному відсотку). Однак це вимагає, щоб перемикач “напруга ” був встановлений у положення “100В”.

Вимірювальні кола і кола живлення приладу САКН-1 під’єднані роздільно до моделі мережі, відповідно, через тумблери “вимірювання” і “живлення”.

Порядок виконання лабораторної роботи

Пункти 1-9 виконуються в лабораторії і відображають експериментальну частину роботи. Інші пункти виконуються вдома і відповідають етапу статистичної обробки отриманих експериментальних даних та прийняття рішень щодо необхідності застосування додаткових засобів регулювання напруги. Методичні вказівки для статистичної обробки експериментальних даних наведені нижче. Робота виконується в такому порядку.

1. Виходячи з того, що попередній експеримент показав можливими відхилення напруги в досліджуваній точці мережі в межах від –15 % до +10 %, необхідно розділити цей діапазон відхилень на вісім інтервалів. Значення границь інтервалів набрати штекерами на матриці “границі інтервалів” і записати в табл. 4.1. Пам’ятати, що межа 100 % завжди повинна знаходитися між четвертим і п’ятим інтервалами.

Таблиця 4.1 – Результати експериментів

Номер лічильника № п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Значення меж інтервалів								
2. Початкові покази лічильника								
3. Кінцеві покази лічильника								
4. Різниця показів лічильника								

2. Записати покази лічильників до вимірювання в табл. 4.1;
3. Тумблер “контроль – робота” виставити в положення “робота”;
4. Перемикач “напруга” виставити в положення 100В;
5. Обрати необхідний період вимірювань контрольованої напруги, для цього: тумблер потенціометра “час” виставляється в крайнє ліве положення. При цьому забезпечується період вимірювань, який не перевищує 10 с;
6. Перемикач “зсув” встановити в положення, яке забезпечує вимірювання очікуваного діапазону відхилень напруги (в даному випадку – 5 %);
7. Тумблер “мережа – вимк.” перевести в положення “мережа”;
8. Увімкнути живлення стенда за допомогою пакетного вимикача. Увімкнути силові і вимірювальні кола приладу за допомогою відповідних тумблерів, розташованих на стенді. Переконатися, що лічильники фіксують знаходження напруги в усіх діапазонах вимірювань. Провести контроль напруги протягом однієї години.
Після цього вимкнути вимірювальні і силові кола приладу САКН-1, а також пакетний вимикач стенда;
9. Записати в табл. 4.1 кінцеві покази цифрових індикаторів. Визначити і записати в останній рядок різницю показів кожного лічильника;
10. Побудувати гістограму щільностей частоти відхилення напруги на основі отриманих експериментальних даних;
11. Визначити стан і вибіркві числові характеристики відхилення напруги (математичне сподівання, середньоквадратичне відхилення, дисперсію);
12. На основі критерію згоди Пірсона χ^2 перевірити статистичну гіпотезу про нормальний закон розподілу ймовірностей для відхилень напруги;
13. Якщо гіпотеза про нормальний розподіл ймовірностей відхилень напруги не буде відкинута, то на основі теоретичного розподілу визначити ймовірність відхилень напруги, недопустимих за ГОСТ 13109-97 для споживачів електроенергії. В іншому випадку визначити зазначену ймовірність на основі початкових даних;
14. Зробити висновок про допустимість якості напруги і необхідність додаткових заходів щодо її регулювання.

Зміст звіту

1. Назва і мета роботи.
2. Короткі теоретичні відомості.
3. Таблиця 4.1 результатів експерименту.
4. Гістограма щільностей частот відхилень напруги.

5. Результати статистичної обробки первинних даних із проміжними розрахунками.

6. Висновки стосовно якості напруги та необхідності додаткових заходів щодо її покращення.

Побудова гістограми щільностей частоти відхилення напруги

Позначимо різницю показів i -го лічильника через n_i . Визначимо частоту попадання відхилень напруги в діапазон вимірювань кожного лічильника:

$$\bar{p}_i = \frac{n_i}{n}, \quad i=1, \dots, 8,$$

де $n = \sum_{i=1}^8 n_i$ – кількість експериментальних вимірювань відхилень напруги.

Знайдемо щільність частоти відхилень напруг для кожного лічильника:

$$\frac{\bar{p}_i}{\Delta V_i} = \frac{\bar{P}_i}{V_{\epsilon_i} - V_{n_i}}, \quad i=1, \dots, 8,$$

де V_{B_i} , V_{H_i} – відповідно, верхня і нижня межі інтервалу чутливості i -го лічильника.

Побудуємо гістограму щільностей частоти відхилення напруги. Для цього необхідно відкласти на осі абсцис у вибраному масштабі межі інтервалів чутливості лічильників, а на осі ординат отримані щільності частоти (рис. 4.1.).

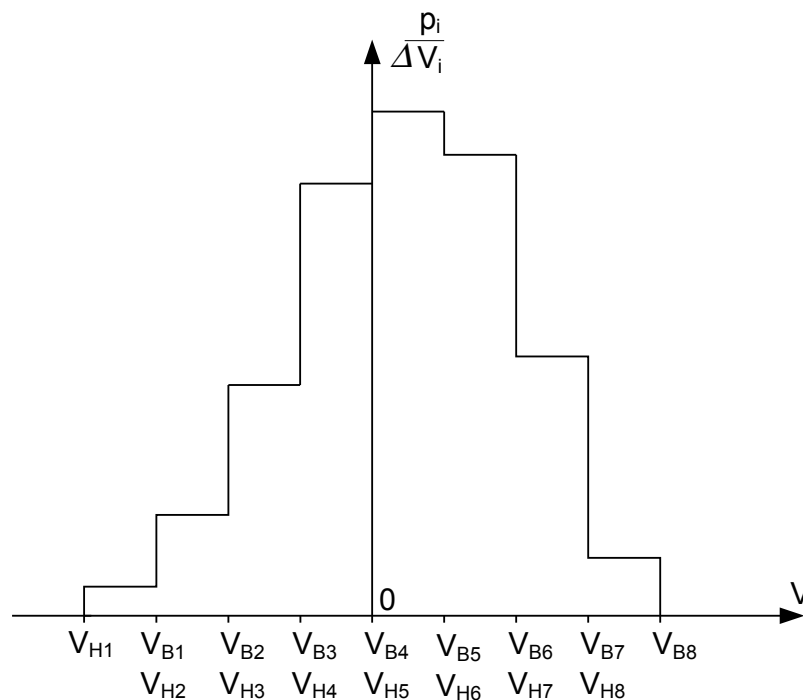


Рисунок 4.1 – Гістограма щільностей частоти відхилення напруги

При побудові гістограми масштаб вибирають таким, щоб максимальна ордината складала 5/8 основи. Площа графіка повинна бути рівною одиниці.

Визначення вибірових числових характеристик відхилення напруги

За математичну модель для відхилень напруги приймається випадкова величина з нормальним розподілом ймовірностей. Для такої випадкової величини визначальними числовими характеристиками є математичне сподівання $M(V)$ і дисперсія $D(V)$ (чи середньоквадратичне відхилення $\sigma(V)$).

Оцінки числових характеристик виражають через вибірові дані, і через випадковість вибірки, самі є випадковими величинами. Для того, щоб статистичні оцінки давали „добрі” наближення оцінюваних параметрів, вони повинні бути незміщеними, ефективними і спроможними. Незміщеною називають статистичну оцінку, математичне сподівання якої дорівнює оцінюваному параметру. Ефективною називають статистичну оцінку, яка (за даного обсягу вибірки n) має найменшу можливу дисперсію. Спроможною називають статистичну оцінку, яка при $n \rightarrow \infty$ прагне за ймовірністю наблизитись до оцінюваного параметра.

У математичній статистиці доведено, що вимоги незміщеності, ефективності і спроможності задовольняють основні вибірові характеристики : вибірова середня $\bar{M}(V)$ і вибірова дисперсія $\bar{D}(V)$:

$$\bar{M}(V) = \frac{\left(\sum_{i=1}^8 n_i \cdot V_i \right)}{n} = \sum_{i=1}^8 V_i \bar{p}_i ;$$

$$D(V) = \frac{\bar{M}[V - \bar{M}(V)]^2 n}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^8 n_i [V_i - M(V)]^2}{n-1} =$$

$$\bar{M}[V^2] - \bar{M}^2(V) = \left[\sum_{i=1}^8 V_i^2 \bar{p}_i - \bar{M}^2(V) \right] \frac{n}{n-1},$$

де V_i – центр діапазону чутливості i – го лічильника.

Вибіркове середньоквадратичне відхилення $\bar{\sigma}(V) = \sqrt{\bar{D}(V)}$.

Перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу ймовірностей для відхилення напруги на основі критерію згоди Пірсона χ^2

Якщо поводження випадкової величини суперечить гіпотезі про її розподіл ймовірностей, то ми можемо відкинути таку гіпотезу, впевнившись в тому, що розбіжності між статистичними даними і теоретичним законом розподілу ймовірностей мають занадто велику ймовірність.

У цьому випадку ми спостерігаємо практично неможливі події, і гіпотеза повинна бути відкинута з практичною вірогідністю.

В іншому випадку потрібно зробити висновок про те, що статистичні дані не суперечать прийнятій гіпотезі, однак, це не означає, що гіпотеза обов'язково правильна.

В критерії згоди Пірсона за міру розбіжності статистичного і теоретичного розподілів приймається величина χ^2 (хі-квадрат):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - n \cdot p_i)^2}{n \cdot p_i}$$

де k – кількість інтервалів, на які поділений діапазон вимірювань випадкової величини. У нашому випадку $k=8$, тому що прилад САКН-1 має 8 цифрових індикаторів. Однак деякі інтервали можуть бути об'єднані в один. У цьому випадку k буде меншим від восьми;

p_i – теоретична ймовірність попадання в i – ий інтервал згідно з гіпотезою про розподіл ймовірностей випадкової величини.

Приймаючи гіпотезу про нормальний розподіл ймовірностей відхилень напруги з математичним очікуванням $\bar{M}(V)$ і середньоквадратичним відхиленням $\bar{\sigma}(V)$, одержимо:

$$p_1 = N(V_{B_1}) = \Phi\left(\frac{V_{B_1} - \bar{M}(V)}{\bar{\sigma}(V)}\right);$$

$$p_k = 1 - N(V_{H_k}) = 1 - \Phi\left(\frac{V_{H_k} - \bar{M}(V)}{\bar{\sigma}(V)}\right);$$

$$p_i = N(V_{B_i}) - N(V_{H_i}) = \Phi\left(\frac{V_{B_i} - \bar{M}(V)}{\bar{\sigma}(V)}\right) - \Phi\left(\frac{V_{H_i} - \bar{M}(V)}{\bar{\sigma}(V)}\right), \quad i=2, \dots, k-1,$$

де $N(x)$ – функція нормального розподілу ймовірностей з математичним сподіванням $a = \bar{M}(V)$ і середньоквадратичним відхиленням $\sigma = \bar{\sigma}(V)$

$$N(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp[-(t-a)^2/2\sigma^2] dt;$$

$\Phi(x)$ – табульована функція нормального розподілу ймовірностей з математичним сподіванням, що дорівнює нулю, і середньоквадратичним відхиленням, яке дорівнює одиниці,

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp[-(t)^2/2] dt.$$

Використавши таблиці для функції Лапласа (табл. 4.3), легко визначити шукані ймовірності для всіх інтервалів, а потім значення χ^2 .

Обчислення величини χ^2 зручно виконувати в табличному вигляді (див. табл. 4.2). При цьому варто мати на увазі, що занадто малі значення для np_i недопустимі. На практиці інтервали для яких $np_i < 5$, об'єднують із сусідніми інтервалами.

Для перевірки правильності розрахунків необхідно переконатися, що

$$\sum_{i=1}^k n_i = \sum_{i=1}^k n \cdot p_i = n ; \sum_{i=1}^k p_i = 1 .$$

Таблиця 4.2 – Обчислення величин для знаходження χ^2

Номер інтервалу	n_i	p_i	np_i	$(n_i - np_i)^2 / np_i$
1				
2				
⋮				
⋮				
⋮				
k				
Всього	$\Sigma n_i = n$	$\Sigma p_i = 1$	$\Sigma np_i = n$	χ^2

Алгоритм використання критерію χ^2 повинен бути таким:

1. Вибирається рівень значимості α , тобто ймовірність, за якої розбіжності статистичного і теоретичного розподілів можна вважати практично неможливими. Зазвичай вибирають $\alpha = 0,05$;

2. Визначається кількість ступенів свободи

$$\rho = (k - 1) - l,$$

де l – кількість оцінюваних параметрів теоретичного розподілу ймовірностей. У випадку нормального розподілу ймовірностей оцінюються два параметри – математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення. Для такого випадку $\rho = k - 3$.

3. Для вибраного рівня значимості і знайденої кількості ступенів свободи з таблиці квантилів розподілу Пірсона (див. табл. 4.4) знаходять значення величини χ_α^2 .

4. Порівнюють попередньо розраховане значення $\bar{\chi}^2$ з χ_α^2 . Якщо $\bar{\chi}^2 < \chi_\alpha^2$, то емпіричні дані погоджуються з обраним теоретичним розподілом ймовірностей. Якщо $\bar{\chi}^2 \geq \chi_\alpha^2$, то гіпотеза відкидається з ймовірністю помилки не більшою від α .

Визначення ймовірності недопустимих відхилень напруги

Позначимо нижню і верхню межі діапазону допустимих відхилень напруги, відповідно, $V_{нд}$ і $V_{вд}$.

Якщо відхилення напруги підкоряються нормальному розподілу ймовірностей, то визначити ймовірність допустимих за ГОСТ 13109-97 відхилень напруги можна, використавши функцію Лапласа:

$$P(V[V_{нд}, V_{вд}]) = \Phi\left(\frac{V_{вд} - \bar{M}(V)}{\bar{\sigma}(V)}\right) - \Phi\left(\frac{V_{нд} - \bar{M}(V)}{\bar{\sigma}(V)}\right).$$

Недопустимі відхилення напруги характеризує протилежна випадкова подія, тому:

$$P(V[V_{нд}, V_{вд}]) = 1 - P(V \notin [V_{нд}, V_{вд}]).$$

Якщо гіпотеза про нормальний розподіл ймовірностей виявилась відкинутою, то оцінку ймовірності недопустимих відхилень напруги можна зробити за вибірковими даними:

$$P(V[V_{\text{нд}}, V_{\text{вд}}]) = \frac{n_{\text{вих}}}{n} = \sum_{j=1}^v n_{\text{вих } j} / n = \sum_{j=1}^v \bar{p}_{\text{вих } j},$$

де $n_{\text{вих}}$ – сумарна кількість вимірювань напруги, що вийшли за допустимі межі;

v – кількість лічильників, які реєструють вихід напруги за допустимі межі;

$n_{\text{вих } j}$ – різниця показів j -го лічильника, який реєстрував недопустимі за ГОСТ 13109–97 відхилення напруги;

$\bar{p}_{\text{вих}}$ – вибірка ймовірність (частота) знаходження напруги за допустимими межами, що реєструється j -м лічильником.

Якщо $P(V[V_{\text{нд}}, V_{\text{вд}}]) \geq 0.05$, то якість напруги непридатна, і вживаються заходи для її поліпшення.

Контрольні запитання

1. Назвіть основні показники якості електроенергії і дайте їм коротку характеристику.
2. Чим відрізняються вимоги ГОСТ 13109-97 до відхилень напруги в нормальних і післяаварійних режимах роботи ?
3. Які значення відхилень напруги є допустимими?
4. Якщо на основі одного вимірювання виявлено недопустиме значення показника якості електроенергії, то чи можна зробити впевнений висновок про непридатну якість електроенергії? Чому?
5. За якої ймовірності недопустимих відхилень напруги можна зробити висновок про непридатну якість електроенергії ?
6. Відхилення напруги підкоряються нормальному закону розподілу ймовірностей $M(V)=5\%$; $\sigma(V) = 5\%$. Чи відповідає якість напруги вимогам ГОСТ 13109-97?
7. Напруга в мережі змінюється в межах від $0,975U_n$ до $1,1U_n$, підлягає нормальному закону розподілу. Для якого максимального значення середньоквадратичного відхилення $\sigma(U)$ за $M(U)=U_n$ якість напруги ще буде відповідати ГОСТ 13109-97?
8. Яка ймовірність помилкового відхилення гіпотези про нормальний розподіл за результатами Ваших статистичних розрахунків?
9. Яка ймовірність того, що напруга буде нижчою від номінального значення за результатами Вашого статистичного аналізу?

Таблиця 4.3 – Функція Лапласа $\Phi(x)$ ($\Phi(-x)=1-\Phi(x)$)

x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$	x	$\Phi(x)$
1	2	3	4	5	6	7	8

0.00	0.5	0.52	0.6985	1.03	0.8485	1.54	0.9387
0.01	0.504	0.53	0.7019	1.04	0.8508	1.55	0.9394
0.02	0.508	0.54	0.7054	1.05	0.8531	1.56	0.9406
0.03	0.512	0.55	0.7088	1.06	0.8554	1.57	0.9418
0.04	0.516	0.56	0.7123	1.07	0.8577	1.58	0.9429
0.05	0.5199	0.57	0.7158	1.08	0.8599	1.59	0.9441
0.06	0.5239	0.58	0.7190	1.09	0.8621	1.60	0.9452
0.07	0.5279	0.59	0.7224	1.10	0.8643	1.61	0.9463
0.08	0.5319	0.60	0.7257	1.11	0.8665	1.62	0.9474
0.09	0.5359	0.61	0.7291	1.12	0.8686	1.63	0.9484
0.10	0.5398	0.62	0.7324	1.13	0.8708	1.64	0.9494
0.11	0.5438	0.63	0.7357	1.14	0.8729	1.65	0.9505
0.12	0.5478	0.64	0.7389	1.15	0.8749	1.66	0.9515
0.13	0.5517	0.65	0.7422	1.16	0.8770	1.67	0.9525
0.14	0.5557	0.66	0.7454	1.17	0.8790	1.68	0.9535
0.15	0.5596	0.67	0.7486	1.18	0.8810	1.69	0.9545
0.16	0.5636	0.68	0.7517	1.19	0.8830	1.70	0.9554
0.17	0.5675	0.69	0.7549	1.20	0.8849	1.71	0.9564
0.18	0.5714	0.70	0.7580	1.21	0.8869	1.72	0.9573
0.19	0.5753	0.71	0.7611	1.22	0.8883	1.73	0.9582
0.20	0.5793	0.72	0.7642	1.23	0.8907	1.74	0.9591
0.21	0.5832	0.73	0.7673	1.24	0.8925	1.75	0.9599
0.22	0.5871	0.74	0.7703	1.25	0.8944	1.76	0.9608
0.23	0.5910	0.75	0.7734	1.26	0.8992	1.77	0.9616
0.24	0.5948	0.76	0.7764	1.27	0.8980	1.78	0.9625
0.25	0.5997	0.77	0.7794	1.28	0.8997	1.79	0.9633
0.26	0.6026	0.78	0.7823	1.29	0.9015	1.80	0.9641
0.27	0.6064	0.79	0.7852	1.30	0.9032	1.81	0.9649
0.28	0.6103	0.80	0.7881	1.31	0.9049	1.82	0.9656
0.29	0.6141	0.81	0.7910	1.32	0.9066	1.83	0.9664
0.30	0.6179	0.82	0.7939	1.33	0.9083	1.84	0.9671

Продовження таблиці 4.3

1	2	3	4	5	6	7	8
0.31	0.6217	0.83	0.7969	1.34	0.9099	1.85	0.9679
0.32	0.6255	0.84	0.7995	1.35	0.9115	1.86	0.9686
0.33	0.6293	0.85	0.8023	1.36	0.9131	1.87	0.9693
0.34	0.6331	0.86	0.8051	1.37	0.9147	1.88	0.9699
0.35	0.6369	0.87	0.8078	1.38	0.9162	1.89	0.9706
0.36	0.6406	0.88	0.8106	1.39	0.9177	1.90	0.9713
0.37	0.6443	0.89	0.8133	1.40	0.9192	1.91	0.9719

0.38	0.6480	0.90	0.8159	1.41	0.9209	1.92	0.9726
0.39	0.6517	0.91	0.8186	1.42		1.93	0.9732
0.40	0.6554	0.92	0.8212	1.43	0.9236	1.94	0.9738
0.41	0.6591	0.93	0.8238	1.44	0.9251	1.95	0.9744
0.42	0.6628	0.94	0.8264	1.45	0.9265	1.96	0.9750
0.43	0.6664	0.95	0.8289	1.46	0.9279	1.97	0.9756
0.45	0.6700	0.96	0.8315	1.47	0.9292	1.98	0.9761
0.46	0.6736	0.97	0.8340	1.48	0.9303	1.99	0.9767
0.47	0.6808	0.98	0.8365	1.49	0.9319	2.00	0.9772
0.48	0.6844	0.99	0.8389	1.50	0.9332	2.02	0.9783
0.49	0.6879	1.00	0.8414	1.51	0.9345	2.04	0.9793
0.50	0.6915	1.01	0.8438	1.52	0.9357	2.06	0.9803
0.51	0.6950	1.02	0.8461	1.53	0.9370	2.08	0.9812
2.10	0.9821	2.38	0.9913	2.70	0.9965	2.98	0.99856
2.12	0.9830	2.40	0.9918	2.72	0.9967	3.00	0.99865
2.14	0.9838	2.42	0.9922	2.74	0.9969	3.20	0.99931
2.16	0.9846	2.46	0.9931	2.76	0.9971	3.40	0.99966
2.18	0.9854	2.48	0.9934	2.78	0.9973	3.60	0.99984
2.20	0.9861	2.50	0.9938	2.80	0.9974	3.80	0.99928
2.22	0.9868	2.52	0.9941	2.82	0.9976	4.00	0.99968
2.24	0.9875	2.54	0.9945	2.84	0.9977	5.00	0.999997
2.26	0.9881	2.56	0.9948	2.86	0.9979		
2.28	0.9887	2.58	0.9951	2.88	0.9980		
2.30	0.9893	2.60	0.9953	2.90	0.9981		
2.32	0.9898	2.62	0.9956	2.92	0.9982		
2.34	0.9904	2.64	0.9959	2.94	0.9984		
2.36	0.9909	2.68	0.9963	2.96	0.99846		

Таблиця 4.4 – Розподіл Пірсона χ^2

Кількість ступенів свободи ρ	Рівень значимості α			
	0.01	0.025	0.05	0.1
1	2	3	4	5
1	6.6	5.0	3.8	2.71
2	9.2	7.4	6.0	4.61
3	11.3	9.4	7.8	6.25
4	13.3	11.1	9.5	7.78
5	15.1	12.8	11.1	9.24

6	16.8	14.4	12.6	10.64
7	18.5	16.0	14.1	12.02
8	20.1	17.5	15.5	13.36
1	2	3	4	5
9	21.7	19.0	16.9	14.68
10	23.2	20.5	18.3	15.99
11	24.7	21.9	19.7	17.28
12	26.2	23.3	21.0	18.55
13	27.7	24.7	22.4	19.81
14	29.1	26.1	23.7	21.06
15	30.6	27.5	25.0	22.31
16	32.0	28.8	26.3	23.54
17	33.4	30.2	27.6	24.77
18	34.8	31.5	28.9	25.39
19	36.2	32.9	30.1	27.20
20	37.6	34.2	31.4	28.41

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НЕСИМЕТРІЇ НАПРУГ

Мета роботи: ознайомитись з вимогами ГОСТ 13109-97 щодо експериментального визначення параметрів *несиметрії напруг (voltage unbalance)*.

Теоретичні відомості

Несиметрія напруг характеризується такими показниками:

- коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю (*voltages unbalance factor by reverse sequence*);
- коефіцієнтом несиметрії напруг за нульовою послідовністю (*voltages unbalance factor by zero sequence*).

Допустимий рівень несиметрії напруги в вузлах приєднання електричних навантажень встановлено ГОСТ 13109-97 [9]. Нормально допустиме й гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю і за нульовою послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж рівні 2,0 і 4,0 %, відповідно.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} для міжфазних напруг здійснюють у такий спосіб.

Для кожного i -го спостереження за період часу, рівний 24 год, вимірюють одночасно діючі значення міжфазних напруг на основній частоті $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$ у вольтах, кіловольтах.

Обчислюють діюче значення *напруги зворотної послідовності (reverse sequence voltage)* основної частоти $U_{2(1)i}$ за формулою:

$$\frac{1}{12} \left(\sqrt{3} U_{AB(1)i} - \sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} + U_{AB(1)i} \right)^2} \right)^2 + \left(\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2 \quad (5.1)$$

$$U_{2(1)i} = \sqrt{\dot{i} \dot{i}}$$

Обчислюють коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2 U_i}$ у відсотках як результат i -го спостереження:

$$K_{2 U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100, \quad (5.2)$$

де $U_{2(1)i}$ – діюче значення напруги зворотної послідовності основної частоти трифазної системи напруг в i -му спостереженні, В, кВ;

$U_{1(1)i}$ – діюче значення напруги прямої послідовності основної частоти в i -му спостереженні, В, кВ.

При визначенні $K_{2 U_i}$ допускається:

- 1) визначати $U_{2(1)i}$ методом симетричних складових;
- 2) обчислювати $U_{2(1)i}$ за наближеною формулою:

$$U_{2(1)i} \approx 0,62 (U_{нб(1)i} - U_{нм(1)i}), \quad (5.3)$$

де $U_{нб(1)i}$, $U_{нм(1)i}$ – найбільші й найменші діючі значення із трьох міжфазних напруг основної частоти в i -му спостереженні, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення $K_{2 U_i}$ з використанням формули (5.3) замість формули (5.1) не перевищує 8 %;

3) використовувати при обчисленні $U_{2(1)i}$ замість діючих значень міжфазних напруг основної частоти діючі значення відповідних напруг, з урахуванням гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворення синусоїдності кривих напруг, що не перевищує 5 %;

- 4) обчислювати $K_{2 U_i}$ з використанням формули

$$K_{2 U_i} = \frac{U_{2(1)i}}{U_{ном. мф}} \cdot 100, \quad (5.4)$$

де $U_{ном. мф}$ – номінальне значення міжфазної напруги, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення $K_{2 U_i}$ з використанням формули (5.4) замість формули (5.2) чисельно дорівнює значенню відхилення напруги $U_{1(1)i}$ від $U_{ном. мф}$.

Обчислюють значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю $K_{2 U_i}$ у відсотках як результат усереднення N спостережень $K_{2 U_i}$ на інтервалі часу T_{VS} , рівному 3 с, з виразу:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2 U_i}^2}{N}}. \quad (5.5)$$

Кількість спостережень N повинне бути не менше дев'яти [9].

Якість електричної енергії за коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю в точці загального приєднання відповідає вимогам дійсного стандарту, якщо найбільше з усіх виміряних протягом 24 годин значень коефіцієнтів несиметрії напруг за зворотною послідовністю не перевищує гранично допустимого значення, а значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю, що відповідає ймовірності 95 % за встановлений період часу, не перевищує нормально допустимого значення.

При цьому якість електричної енергії за коефіцієнтом несиметрії напруг за зворотною послідовністю відповідає вимогам дійсного стандарту, якщо сумарна тривалість часу виходу за нормально допустимі значення становить не більше 5 % від устанавленого періоду часу, тобто 72 хвилини, а за гранично допустимі значення – 0 % від цього періоду часу.

Вимірювання коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю $K_{0\ U_i}$ проводять у чотирипровідних мережах у такий спосіб.

Для кожного i -го спостереження за період часу, рівний 24 год, вимірюють одночасно діючі значення трьох міжфазних і двох фазних напруг основної частоти $U_{AB(1)i}$, $U_{BC(1)i}$, $U_{CA(1)i}$, $U_{A(1)i}$, $U_{B(1)i}$, у вольтах, кіловольтах.

Визначають діюче значення *напруги нульової послідовності (zero sequence voltage)* основної частоти $U_{0(1)i}$ в i -му спостереженні з формули:

$$U_{0(1)i} = \frac{1}{6} \sqrt{\left[\frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} - 3 \cdot \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right]^2 + \left[\sqrt{4U_{BC(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} + \frac{U_{BC(1)i}^2 - U_{CA(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} - 3 \sqrt{4U_{B(1)i}^2 - \left(U_{AB(1)i} + \frac{U_{B(1)i}^2 - U_{A(1)i}^2}{U_{AB(1)i}} \right)^2} \right]^2}. \quad (5.6)$$

Обчислюють коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю $K_{0\ U_i}$ у відсотках як результат i -го спостереження

$$K_{0\ U_i} = \frac{\sqrt{3} U_{0(1)i}}{U_{1(1)i}} \cdot 100, \quad (5.7)$$

де $U_{0(1)i}$ – діюче значення напруги нульової послідовності основної частоти трифазної системи напруг в i -му спостереженні, В, кВ;

$U_{1(1)i}$ – діюче значення міжфазної напруги прямої послідовності основної частоти, В, кВ.

При визначенні $K_{0\ U_i}$ допускається:

- 1) визначати $U_{0(1)i}$ методом симетричних складових;
- 2) обчислювати $U_{0(1)i}$ при симетрії міжфазних напруг за наближеною формулою:

$$U_{0(1)i} \approx 0,62 \left(U_{нб.\phi(1)i} - U_{нм.\phi(1)i} \right), \quad (5.8)$$

де $U_{нб.\phi(1)i}$, $U_{нм.\phi(1)i}$ – найбільше й найменше із трьох діючих значень фазних напруг основної частоти в i -му спостереженні, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення $U_{0(1)i}$ з використанням формули (5.8) замість формули (5.6) не перевищує $\pm 10\%$;

- 3) застосовувати замість діючих значень міжфазних і фазних напруг основної частоти діючі значення відповідних напруг, з урахуванням

усіх гармонічних складових цих напруг при коефіцієнті спотворення синусоїдності кривих напруг, що не перевищує 5 %;

4) обчислювати $K_{0 U_i}$ за формулою:

$$K_{0 U_i} = \frac{U_{0(1)i}}{U_{ном.ф}} \cdot 100, \quad (5.9)$$

де $U_{ном.ф}$ – номінальне значення фазної напруги, В, кВ.

При цьому відносна похибка визначення $K_{0 U_i}$ з використанням формули (5.9) замість формули (5.7) чисельно дорівнює значенню відхилення напруги $U_{1(1)i}$ від $U_{ном}$.

Обчислюють значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю K_{0U} у відсотках як результат усереднення N спостережень $K_{0 U_i}$ на інтервалі часу T_{VS} , рівному 3 с, з виразу:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0 U_i}^2}{N}}. \quad (5.10)$$

Кількість спостережень N має бути не менше дев'яти [9].

Порядок виконання роботи

Вимірювання здійснюється за допомогою вимірювального приладу параметрів несиметрії напруги. Вимірювальний прилад під'єднується до трифазної чотирипровідної мережі, як показано на рис. 5.1.

Для виконання роботи необхідно:

1. Під'єднати затискачі вимірювального приладу до фазових клем на стенді. Під'єднання контролює викладач.

Фаза А позначена однією смугою ізоляційної стрічки, В – двома, С – трьома, а нульовий провід – трьома смугами, виконаними поряд (виглядає як одна широка смуга).

2. Дати приладу попрацювати 2 хвилини.

3. Під час роботи необхідно виконати вимірювання коефіцієнтів зворотної та нульової послідовностей напруги мережі і порівняти їх з розрахунковими.

Прилад здійснює вимірювання діючих значень фазних напруг, а також синфазної (дійсної) і квадратурної (уявної) складових комплексних коефіцієнтів зворотної та нульової послідовності напруг:

$$k_{2 U_{c\phi}} = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right); \quad k_{2 U_{кв}} = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right); \quad (5.11)$$

$$k_{0 U_{c\phi}} = \operatorname{Re} \left(\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} \right); \quad k_{0 U_{кв}} = \operatorname{Im} \left(\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} \right), \quad (5.12)$$

де $k_{2 U_{c\phi}}$, $k_{2 U_{кв}}$ – синфазна та квадратурна складові комплексних коефіцієнтів зворотної послідовності; $k_{0 U_{c\phi}}$, $k_{0 U_{кв}}$ – синфазна та квадратурна складові комплексних коефіцієнтів нульової послідовності; \dot{U}_1 , \dot{U}_2 , \dot{U}_0 – комплексні напруги, відповідно, прямої, зворотної та

нульової послідовностей.

Покази приладу визначають у відповідності з сигналами світлодіодного індикатора, як показано у табл. 5.1. Через кожні 5 хв знімати по 2 стовпці вимірювань параметрів напруги. Дані записати в табл. 5.2.

Оскільки складові (5.11) та (5.12) не регламентуються ГОСТом 13109-97, то на основі цих величин (усереднених в табл. 5.2) необхідно визначити коефіцієнти зворотної та нульової послідовностей напруг, вимоги до яких встановлені в цьому ГОСТі (відношення діючих значень симетричних складових напруг)

$$k_{2U} = \sqrt{(k_{2Uc\phi})^2 + (k_{2Uкв})^2}; \quad k_{0U} = \sqrt{(k_{0Uc\phi})^2 + (k_{0Uкв})^2}.$$

3. Далі необхідно виконати вимірювання фазних напруг за допомогою вольтметра, і на основі результатів вимірювань розрахувати теоретично коефіцієнти зворотної та нульової послідовностей напруг.

Зв'язок вимірюваних параметрів (5.11), (5.12) з вхідними величинами визначається за формулами, відповідно:

$$k_{2Uc\phi} = \frac{u_2 u_1 + v_2 v_1}{u_1^2 + v_1^2}; \quad k_{2Uкв} = \frac{v_2 u_1 - u_2 v_1}{u_1^2 + v_1^2}; \quad (5.13)$$

$$k_{0Uc\phi} = \frac{u_0 u_1 + v_0 v_1}{u_1^2 + v_1^2}; \quad k_{0Uкв} = \frac{v_0 u_1 - u_0 v_1}{u_1^2 + v_1^2}, \quad (5.14)$$

де u_1, u_2, u_0 – дійсні частини комплексних напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей; v_1, v_2, v_0 – уявні частини комплексних напруг прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Складові виразів (5.13) та (5.14) розраховують за виразами:

$$u_1 = (U_A - 0,5 U_B \cos \psi_B - 0,5 U_C \cos \psi_C - 0,5 \sqrt{3} U_B \sin \psi_B + 0,5 \sqrt{3} U_C \sin \psi_C) / 3;$$

$$v_1 = (-0,5 U_B \sin \psi_B - 0,5 U_C \sin \psi_C + 0,5 \sqrt{3} U_B \cos \psi_B - 0,5 \sqrt{3} U_C \cos \psi_C) / 3;$$

$$u_2 = (U_A - 0,5 U_B \cos \psi_B - 0,5 U_C \cos \psi_C + 0,5 \sqrt{3} U_B \sin \psi_B - 0,5 \sqrt{3} U_C \sin \psi_C) / 3;$$

$$v_2 = (-0,5 U_B \sin \psi_B - 0,5 U_C \sin \psi_C - 0,5 \sqrt{3} U_B \cos \psi_B + 0,5 \sqrt{3} U_C \cos \psi_C) / 3;$$

$$u_0 = (U_A + U_B \cos \psi_B + U_C \cos \psi_C) / 3;$$

$$v_0 = (U_B \sin \psi_B + U_C \sin \psi_C) / 3,$$

де U_A, U_B, U_C – діючі значення напруг фаз А, В, С; ψ_A, ψ_B, ψ_C – кути зсуву між вектором напруги фази А та векторами напруги трьох фаз.

Прийняти, що фазові кути напруг є номінальні (0, 120 і -120 ел.гр).

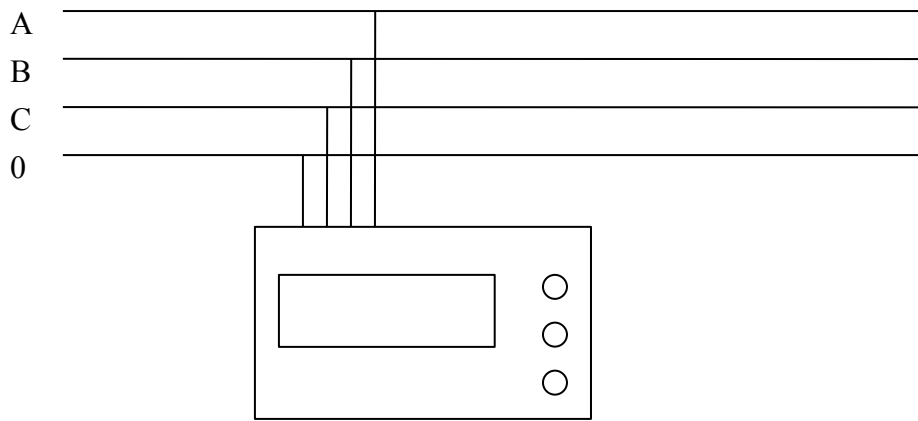


Рисунок 5.1 – Схема під'єднання вимірювального приладу

Таблиця 5.1 – Аналіз показів вимірювального приладу

Вимірювані величини	$\text{Re}\left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}\right)$	$\text{Im}\left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}\right)$	$\text{Re}\left(\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1}\right)$	$\text{Im}\left(\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1}\right)$
Покази світлодіодного індикатора	○ ○ ●	● ○ ●	○ ● ●	● ● ●

Таблиця 5.2 – Експериментальні дані

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_A										
U_B										
U_C										
$\text{Re}\left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}\right)$										
$\text{Im}\left(\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1}\right)$										
$\text{Re}\left(\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1}\right)$										
$\text{Im}\left(\frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1}\right)$										

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСИНУСОЇДНИХ РЕЖИМІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З ВЕНТИЛЬНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Мета роботи: вивчити вплив роботи випрямлячів на електричну мережу і ознайомитись з методикою контролю несинусоїдності.

Теоретичні відомості

Несинусоїдність (nonsinusoidality) є важливим показником якості електричної енергії. Збільшення вмісту *вищих гармонік (higher harmonics)* зменшує надійність електропостачання внаслідок прискореного зношення ізоляції та підвищення ймовірності переходу однофазних замикань в міжфазні, призводить до неправильної дії деяких видів релейного захисту, збільшення похибок лічильників активної та реактивної електроенергії.

Вищі гармоніки негативно впливають на роботу конденсаторних установок. Навіть невеликі напруги вищих гармонік можуть викликати значні струми гармонік. За великої питомої частки нелінійних навантажень конденсаторні установки або вимикаються захистом від перевантаження, або за короткий час виходять з ладу. Можливим є виникнення режиму близького до режиму резонансу струмів на частоті однієї з вищих гармонік.

Показники несинусоїдності. Несинусоїдність напруги (струму) характеризується двома показниками: коефіцієнтом спотворення синусоїдності кривої напруги (струму) і коефіцієнтом n -ї гармонічної складової напруги (струму).

Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги (coefficient of distortion of voltage curve harmonicity) визначається за формулою:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^N U_{(v)}^2}}{U_{ном}} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^N U_{(v)}^2}}{U_{(1)}} \cdot 100\%,$$

де $U_{(v)}$ – діюче значення v -ої гармоніки напруги. При визначенні цього показника допустимо не враховувати гармонічні складові порядку $v > 40$ або складові, значення яких менші за 0,3 відсотки.

Коефіцієнт v -ої гармонічної складової напруги визначається за формулою:

$$K_{U_{(v)}} = \frac{U_{(v)}}{U_{ном}} \cdot 100 \approx \frac{U_{(v)}}{U_{(1)}} \cdot 100.$$

Аналогічно визначаються показники несинусоїдності струму.

Згідно з ГОСТ 13109-97 показники несинусоїдності напруги не повинні перевищувати нормально допустимих значень протягом часу не

менше 95 % кожної доби. І, крім цього, значення цих показників не повинні виходити за межі граничних значень. В табл. 6.1 наведені допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги, а в табл. 6.2 – коефіцієнтів гармонічних складових напруги.

Таблиця 6.1 – Значення коефіцієнта спотворення синусоїдності кривої напруги

Нормально допустиме значення при $U_{ном}, \text{кВ}$				Гранично допустиме значення при $U_{ном}, \text{кВ}$			
0.38	6-20	35	110-330	0.38	6-20	35	110-330
8.0	5.0	4.0	2.0	12.0	8.0	6.0	3.0

Таблиця 6.2 – Значення коефіцієнта v -ої гармонічної складової напруги

Непарні гармоніки, не кратні 3, при $U_{ном}, \text{кВ}$					Непарні гармоніки, кратні 3* при $U_{ном}, \text{кВ}$					Парні гармоніки при $U_{ном}, \text{кВ}$				
v	0.38	6-20	35	110-330	v	0.38	6-20	35	110-330	v	0.38	6-20	35	110-330
5	6.0	4.0	3.0	1.5	3	5.0	3.0	3.0	1.5	2	2.0	1.5	1.0	0.5
7	5.0	3.0	2.5	1.0	9	1.5	1.0	1.0	0.4	4	1.0	0.7	0.5	0.3
11	3.5	2.0	2.0	1.0	15	0.3	0.3	0.3	0.2	6	0.5	0.3	0.3	0.2
13	3.0	2.0	1.5	0.7	21	0.2	0.2	0.2	0.2	8	0.5	0.3	0.3	0.2
17	2.0	1.5	1.0	0.5	>21	0.2	0.2	0.2	0.2	10	0.5	0.3	0.3	0.2
19	1.5	1.0	1.0	0.4						12	0.2	0.2	0.2	0.2
23	1.5	1.0	1.0	0.4						>12	0.2	0.2	0.2	0.2
25	1.5	1.0	1.0	0.4										
>25	0.2+	0.2+	0.2+	0.2+										
	1.3x	0.8x	0.6	0.2										
	25/v	25/v	25/v	25/v										

Примітки: Нормально допустимі значення для 3-ої та 9-ої гармонік відносяться до однофазних мереж. В трифазних трипровідних електричних мережах ці значення приймають вдвічі меншими. Гранично допустимі значення для гармонічних складових приймають в 1,5 рази більшими за нормально допустимі значення, що наведені в таблиці 6.2.

Контроль несинусоїдності напруги здійснюється спеціальними приладами: аналізаторами спектра та аналізаторами гармонік. Наприклад, аналізатор гармонік типу 43250 дозволяє вимірювати K_U , $K_{U(v)}$, $K_{I(v)}$, а

також кут зсуву фаз між гармонічними складовими і напругою основної частоти (до 40-ї гармоніки включно).

Джерела вищих гармонік [12]. Одним із основних джерел вищих гармонік є випрямлячі. Спектральний склад струму випрямляча визначається кількістю фаз випрямлення (кількістю пульсацій) p . Із збільшенням p форма первинного струму перетворювача наближається до синусоїдної, а кількість гармонік зменшується.

У розкладі первинного струму випрямляча на гармонічні складові порядок вищих гармонік визначається за виразом:

$$v = kp \pm 1, \quad k = 1, 2, \dots$$

Так, наприклад, за 6-фазної схеми випрямлення в струмі випрямляча містяться 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 і 25-а гармоніки, а за 12-фазної схеми – 11, 13, 23 і 25-а.

На промислових підприємствах і на транспорті широко використовуються трифазні шестипульсні випрямлячі (рис. 6.1). Вони працюють, як правило, проти ЕРС або на активно-індуктивне навантаження.

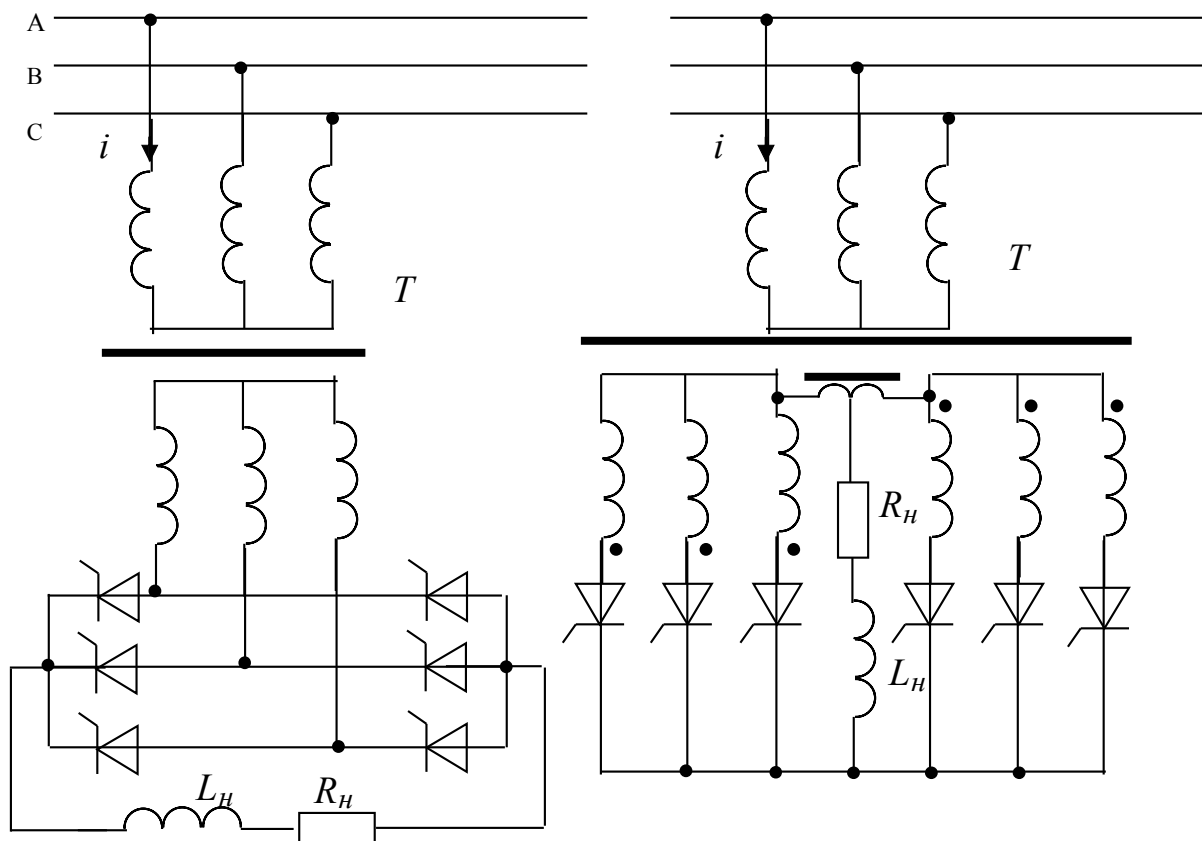


Рисунок 6.1– Трифазні шестипульсні випрямлячі:
а – мостовий випрямляч; б – випрямляч із зрівнювальним реактором

На рис. 6.2 зображена крива струму для $L=\infty$ у разі з'єднання первинної обмотки трансформатора в зірку [12].

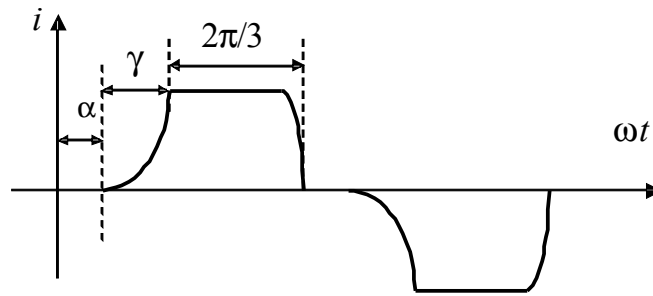


Рисунок 6.2 – Крива первинного струму трифазних випрямлячів для $L=\infty$

З рис. 6.2 видно, що на гармонічний спектр струму істотно впливає значення кутів керування α та комутації γ . Кут комутації γ залежить від кута керування α , середнього значення випрямленого струму I_d та значення індуктивного опору контуру комутації і може бути визначений з рівності [12]

$$\cos \gamma = \cos \alpha - I_d X_{K^*} / \dot{I}$$

де I_d^* – відносне значення випрямленого струму в долях від номінального, X_{K^*} – відносне значення опору контуру комутації в долях від потужності трансформатора. Значення вищих канонічних гармонік струму, що генеруються некерованим випрямлячем, визначають за формулою [12]:

$$I_v = \frac{I_1 \sin\left((v-1)\frac{\gamma}{2}\right)}{v(v-1)\frac{\gamma}{2}}$$

Початкова фаза v -ої гармоніки струму визначається досить точно за формулою $\phi_v = v\phi$. В практичних розрахунках приймають

$$\cos \phi = \frac{U_d}{U_{d0}}$$

де U_d , U_{d0} – середні значення випрямленої напруги, відповідно, в режимі навантаження і холостого ходу. В даному випадку

$$U_{d0} = 1,35 E_2,$$

де E_2 – вторинна фазна ЕРС трансформатора.

Джерела неканонічних та інтергармонік Неканонічними (або аномальними) називаються вищі гармоніки, порядки яких не відповідають числу пульсацій випрямленого струму. Причиною їх виникнення є відхилення кутів керування окремих тиристорів керованих

випрямлячів, що виникають внаслідок несиметрії імпульсів керування. Несиметрія імпульсів керування виникає внаслідок розкиду параметрів окремих елементів системи керування, живлення їх від мережі несинусоїдної напруги. Некеровані випрямлячі також генерують неканонічні вищі гармоніки струму у випадку живлення їх від мережі з спотвореною кривою напруги, а також за несиметрії напруги мережі.

Інтергармоніки – це гармонічні коливання з частотами, які не кратні промисловій частоті. Для інтергармонік частотою меншою від 50 Гц застосовується термін “дрібні ультрагармоніки”. Виникнення інтергармонік обумовлене модуляцією несинусоїдних процесів, а також низькочастотними коливаннями, характерними для мереж з різко змінними навантаженнями. До таких споживачів відносяться, в першу чергу, електродугові сталеплавильні печі, зварювальні установки, тиристорні електроприводи з частотним регулюванням швидкості обертання електродвигунів.

Хід виконання роботи

1. За допомогою аналізатора гармонік типу 43250 провести вимірювання K_U , $K_{U(v)}$, $\varphi_{U(v)}$ в симетричній мережі при вимкненому навантаженні.
2. Увімкнути трифазний мостовий випрямляч або випрямляч із зрівнювальним реактором і знову провести вимірювання K_U , $K_{U(v)}$, $\varphi_{U(v)}$, а також $K_{I(v)}$, $\varphi_{I(v)}$. Зняти осцилограму напруги живлення, струму.
3. Задати несиметричний режим живлення випрямляча і знову провести вимірювання величин, вказаних в п.2.
4. Побудувати часові залежності напруги (струму) на основі проведених в п.2 вимірювань $K_{U(v)}$, $\varphi_{U(v)}$, $K_{I(v)}$, $\varphi_{I(v)}$. Для побудови використати дві (три) гармоніки. Порівняти залежності з осцилограмами.
5. Побудувати амплітудні спектри струму та напруги для випадків симетричного та несиметричного живлення випрямляча.
6. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Які наслідки викликає наявність вищих гармонік?
2. Вкажіть основні джерела вищих гармонік.
3. Які параметри характеризують несинусоїдність напруг?
4. В якій послідовності рекомендується виконувати розрахунок несинусоїдних режимів?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ОДНОФАЗНОГО ЗАМИКАННЯ НА ЗЕМЛЮ В ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ З ІЗОЛЬОВАНОЮ ТА КОМПЕНСОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

Мета роботи: Вивчити особливості режимів однофазного замикання на землю в мережах з ізолюваною та компенсованою нейтраллю, а також з активним опором в нейтралі.

Теоретичні відомості

Мережі з ізолюваною нейтраллю (isolated neutral point circuits)

Однофазні замикання на землю (*single-phase earth connections*) в розподільних мережах 3 і 35 кВ з ізолюваною нейтраллю відносяться до пошкоджень, які супроводжуються малими струмами замикання. Значення струму однофазного замикання на землю в таких мережах визначається, в основному, рівнем напруги і параметрами ізоляції мережі (ємність, активна провідність) відносно землі. В свою чергу, параметри ізоляції залежать від факторів, основні з яких – виконання розподільної мережі (повітряні чи кабельні лінії) і фізичні параметри лінії (переріз струмопровідних жил, довжина, висота підвішування і т.д.) [13].

Оскільки пристрої захисту мереж основані на використанні параметрів нульової послідовності, то для оцінки їх чутливості і працездатності необхідно знати характер зміни їх амплітудних і фазних значень в усталеному режимі однофазного замикання на землю, вплив на них параметрів ізоляції та перехідного опору в точці замикання.

Схема заміщення розподільної мережі з ізолюваною нейтраллю зображена на рис. 7.1.

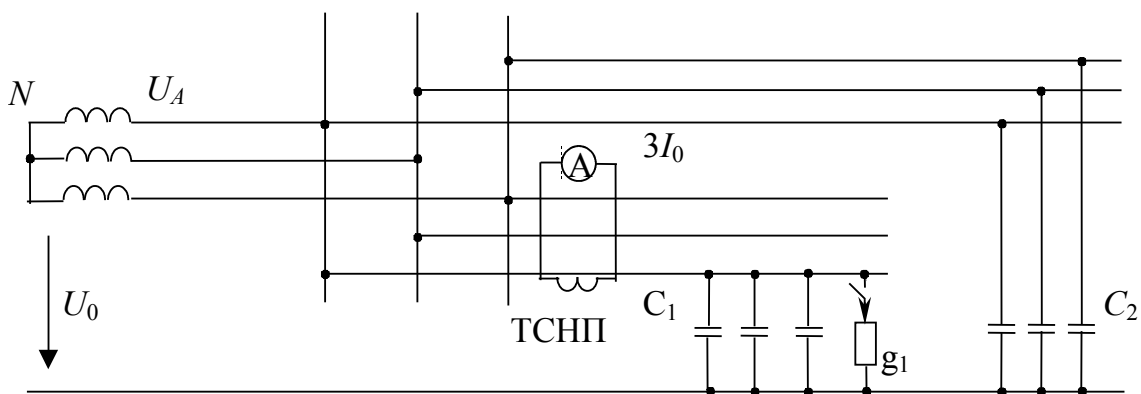


Рисунок 7.1 – Схема заміщення мережі з ізолюваною нейтраллю

Напряга нульової послідовності відносно землі та трикратний струм нульової послідовності будуть [13]:

$$\dot{U}_0 = -\frac{g_1 \dot{U}_A}{g_1 + 3j\omega(C_1 + C_2)}; \quad 3\dot{I}_0 = -\dot{U}_0(3j\omega C_2).$$

Для $\dot{U}_A = 6000$ В; $g_1 = (0,1 \cdot 10^{-4}; 10^{-4}; 10 \cdot 10^{-4}; 100 \cdot 10^{-4})$ См; $3\omega C_1 = 10^{-4}$ См; $3\omega C_2 = 4 \cdot 10^{-4}$ См, в табл. 7.1 наведені значення U_0 та $3I_0$. в залежності від g_1 .

Таблиця 7.1 – Напряга нульової послідовності відносно землі та трикратний струм нульової послідовності мережі з ізолюваною нейтраллю

Величини	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
g_1 , См	$0,1 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	$10 \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$
\dot{U}_0 , В	$120 \cdot e^{j90}$	$1176 \cdot e^{j101,31}$	$5366 \cdot e^{j153,43}$	$5992,5 \cdot e^{j117,14}$
$3\dot{I}_0$, А	0,048	$0,47 \cdot e^{j11,3}$	$2,15 \cdot e^{j63,43}$	$2,4 \cdot e^{j87,14}$

На рис. 7.2 зображені кругові діаграми напруги та струму нульової послідовності в залежності від g_1 . Струм \dot{I}_0 зображено для випадку пошкодження в контрольованому приєднанні.

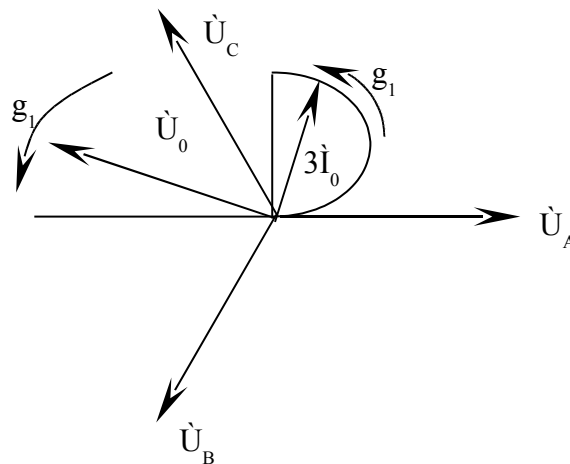


Рисунок 7.2 – Кругові діаграми в мережі з ізолюваною нейтраллю

Оскільки у випадку однофазних замикань на землю струм пошкодження порівняно малий, а лінійні напруги не змінюються, то живлення споживачів не порушується і негайного вимкнення однофазного замикання на землю, в більшості випадків, не вимагається. Захист повинен діяти на сигнал з тим, щоб черговий персонал міг перед ручним вимкненням пошкодженої ділянки вжити заходів щодо зниження збитків від наслідків цього вимкнення.

Необхідно враховувати [11], що тривала робота із замиканням на землю в мережі недопустима. Наприклад, горіння дуги однофазного замикання може призвести до переходу його в міжфазне КЗ, а підвищення фазної напруги непошкоджених фаз – до другого замикання на землю, оскільки напруга непошкоджених фаз відносно землі збільшується в $\sqrt{3}$ разів. Можливе також небезпечне підвищення напруги дотику через

збільшення опору заземлювачів внаслідок висихання ґрунту поблизу опор.

В розподільних мережах, які живлять нестационарні електроустановки (торфопідприємства, кар'єри, шахти та інші), замикання на землю повинні вимикатися негайно, оскільки вони пов'язані з підвищеною небезпекою для людей. Подвійні замикання на землю з цієї ж причини повинні вимикатися на обох пошкоджених елементах.

Розподільні мережі з ізольованою нейтраллю обладнані, в основному, пристроями захисту від однофазних замикань, що реагують на параметри нульової послідовності (струм, напругу, потужність). Найбільшого поширення набули пристрої релейного захисту направленої дії ЗЗП-1 та РЗН-3, а також струмові пристрої захисту (РТЗ-50, РТЗ-51, РТ 40/02 та ін.). Однак якість роботи пристроїв захисту від замикань на землю, що знаходяться в експлуатації, не відповідає вимогам і кількість неселективних спрацювань захисту складає від 20 до 50% (по кар'єрах). Спостерігаються також випадки відмов в дії пристроїв захисту [13].

Мережі з компенсованою нейтраллю (*compensated neutral point circuits*)

Компенсація ємнісного струму однофазного замикання на землю в електричних мережах 3 і 35 кВ, у відповідності з ПУЕ, застосовується за таких значень ємнісного струму в усталеному режимі замикання:

- в мережах 3 і 20 кВ, які мають залізобетонні і металеві опори на повітряних лініях, і в мережах напругою 35 кВ незалежно від виконання, зі струмом замикання >10 А;
- в мережах, що не мають залізобетонних і металевих опор на повітряних лініях напругою 3 і 6, 10, 20 кВ, зі струмами замикання, відповідно, >30 А; >20 А; >15 А.

Для компенсування ємнісних струмів замикання на землю до нейтралі мережі під'єднують індуктивність, за допомогою якої при замиканні на землю створюється індуктивна складова струму однофазного замикання на землю.

Ефективність компенсування ємнісних струмів і роботи електричних мереж з компенсованою нейтраллю значно залежить від режиму налагодження компенсувального пристрою. Перевага надається резонансному налагодженню компенсувального пристрою з ємністю мережі відносно землі, з дотриманням умови

$$X_L = X_C \text{ або } \omega L_K = 1/\omega C.$$

У випадку рівності ємнісної I_C та індуктивної I_L складових струму замикання на землю, залишковий струм замикання стає рівним активній складовій струму замикання (без врахування гармонічних складових струму замикання).

Для мережі з компенсованою нейтраллю [13]

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_A \frac{g_1}{3j\omega(C_1 + C_2) - j\frac{1}{\omega L_K} + g_1}; \quad 3\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 \left(3j\omega C_2 - j\frac{1}{\omega L_K} \right),$$

де C – ємність однієї фази всієї електрично зв'язаної мережі відносно землі.

Напруга нульової послідовності залежить, в основному, від провідності g_1 в точці замикання і режиму налагодження компенсувального пристрою. Ступінь впливу провідності g_1 на напругу U_0 за резонансного налагодження компенсувального пристрою зростає зі збільшенням сумарної ємності мережі відносно землі. Розлагодження резонансного режиму компенсування (як перекомпенсування, так і недокомпенсування) приводить до зниження напруги нульової послідовності (рис. 7.3.).

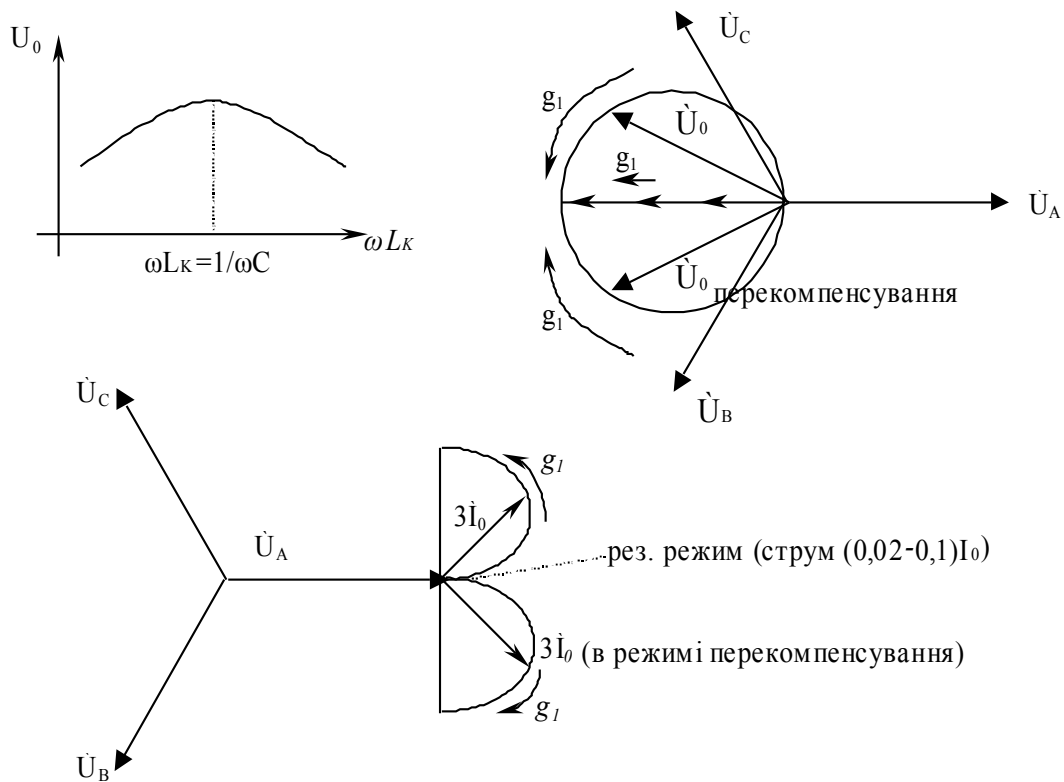


Рисунок 7.3. – Кругові діаграми в мережах з компенсованою нейтраллю

В загальному випадку пристрої захисту від однофазних замикань на землю, які реагують на параметри нульової послідовності, в мережах з компенсованою нейтраллю недієздатні. Значення і фаза залишкового струму замикання на землю, як і струму нульової послідовності в пошкоджену приєднанні, визначаються режимом налагодження компенсувального пристрою. За резонансного або близького до нього

налагодження компенсувального пристрою струм нульової послідовності в пошкодженому приєднанні, як правило, менший від власного ємнісного струму, що виключає можливість застосування струмових захистів нульової послідовності в таких мережах. Застосування в мережах з компенсованою нейтраллю традиційних направлених пристроїв захисту від замикань на землю, які реагують на напрямок потужності нульової послідовності, теж є неможливим, тому що кут між струмом і напругою нульової послідовності в таких мережах залежить від режиму компенсації і змінюється в межах 180 градусів.

Для виконання захисту від замикань на землю для компенсованих мереж рекомендують пристрої, які реагують на гармонічні складові струму замикання, на кидки ємнісного струму в перехідному режимі і на накладений струм непромислової частоти.

Мережі з активним опором в нейтралі

Досвід експлуатації розподільних мереж з ізольованою нейтраллю показує, що основна частка невикористаних вимкнень припадає на помилкове спрацювання захистів від однофазних замикань на землю. Основною причиною помилкових спрацювань цих захистів слід вважати виникнення в мережі після вимкнення пошкодженого приєднання коливального процесу з частотою, що близька до 50 Гц. Коливання виникають за певних відношень ємнісної та індуктивної (обмотки вимірювальних трансформаторів напруги з заземленою нейтраллю) провідностей мережі відносно землі, які утворюють коливальний контур. Коливання сприймаються захисними пристроями як сигнали струму і напруги нульової послідовності.

Для усунення помилкових спрацювань пристроїв захисту від замикань на землю, викликаних цими коливаннями, необхідно усунути або різко скоротити тривалість перехідних процесів. Одним із ефективних методів усунення коливань є зменшення добротності коливального контура шляхом зниження значення активного опору ізоляції мережі відносно землі. Ефективність такого способу є суттєвою, якщо активна складова струму замикання на землю складає приблизно 50% від ємнісного.

Високовольтні резистори можуть бути увімкнені: 1) в нейтраль вторинної обмотки силового трансформатора зі схемою зірка з нулем; 2) в нейтраль первинної обмотки трансформатора власних потреб (навантаження ТВП повинні бути увімкнені тільки на міжфазні напруги); 3) в нейтраль первинної обмотки спеціального заземлювального трансформатора; 4) між кожною фазою і землею трьох опорів, з'єднаних в зірку зі штучною нульовою точкою [13].

Низьковольтні резистори можуть бути увімкнені: 1) у вторинну обмотку спеціального однофазного трансформатора, первинна обмотка

якого вмикається між нейтральною точкою мережі і землею; 2) у вторинні обмотки трьох однофазних трансформаторів зі схемою зірка з заземленою нульовою точкою – розімкнутий трикутник; 3) у приєднані додаткові обмотки трансформаторів НТМИ.

Для мережі з активним опором в нейтралі (рисунок 7.4) [13]:

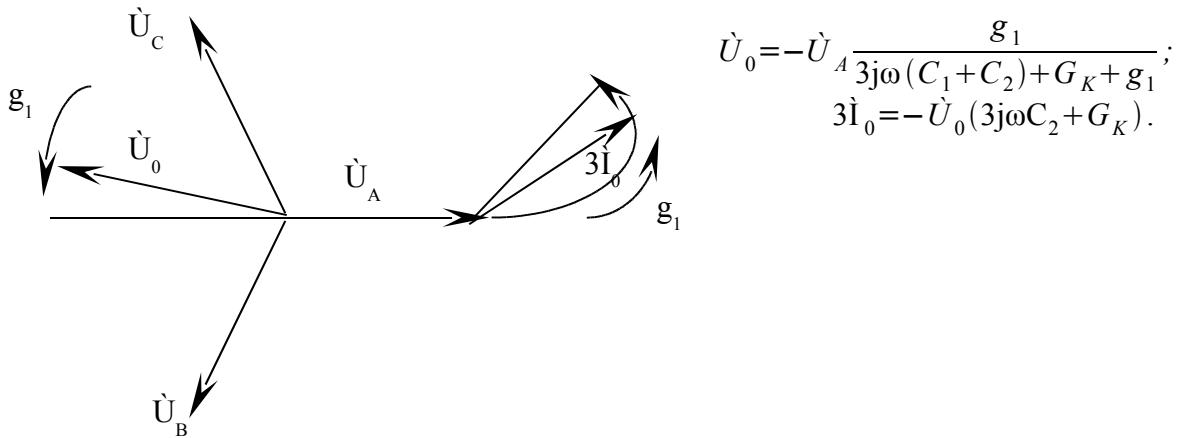


Рисунок 7.4 – Кругові діаграми в мережі з активним опором в нейтралі
Замикання на землю зі сторони електроприймача (ЕП)

Замикання на землю зі сторони ЕП в розподільних мережах виникають, як правило, після обриву проводу ПЛЕП. Замикання відбувається через обмотки ЕП, тобто через первинні обмотки силових трансформаторів або статорні обмотки високовольтних ЕД (рисунок 7.5).

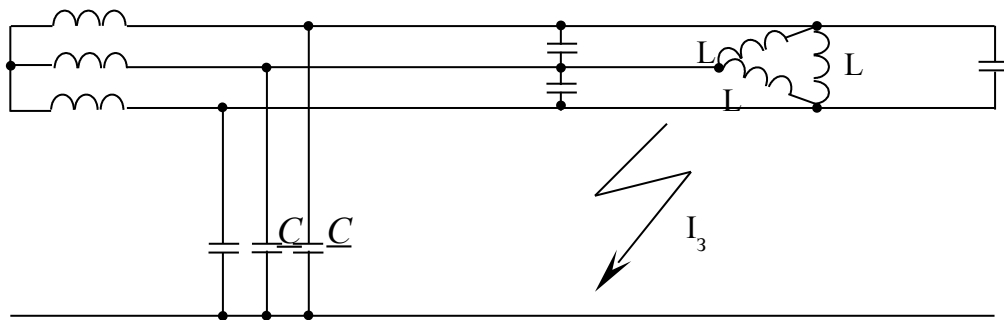


Рисунок 7.5 – Схема заміщення мережі після обриву та замикання проводу на землю
проводу

Напруга нульової послідовності для металевого замикання на землю [13]:

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_B + \dot{U}_C}{3\omega^2 LC - 2} = -\frac{\dot{U}_A}{3\omega^2 LC - 2} = \frac{\dot{U}_A}{2 - 3\omega^2 LC}.$$

Напруга U_0 може перевищувати напругу U_A .

У разі замикання на землю зі сторони ЕП не можна нехтувати ємністю між фазами ділянки лінії після місця пошкодження. Ця ємність разом з індуктивністю ЕП утворює зв'язок між системою і, відокремленою

розривом, частиною пошкодженої лінії.

Напруги: $U_L = (2,25 - 2,5)U_\Phi$; $U_C'' = (3,75 - 4)U_\Phi$.

Трикратний струм нульової послідовності: $3\dot{I}_0 = -\dot{U}_0 3j\omega C_2$.

Кругові діаграми напруги та струму нульової послідовності зображені на рис. 7.6.

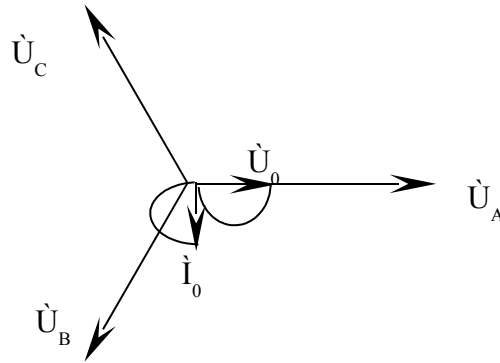


Рисунок 7.6 – Кругові діаграми \dot{U}_0 , \dot{I}_0 при замиканні на землю зі сторони ЕП

Завдання

1. Скласти електричне коло (рис.7.1) для дослідження.
2. За допомогою вольтметра виміряти лінійні (U_{AB} , U_{BC} , U_{CA}) та фазні між точками А, В, С і нейтраллю (U_A , U_B , U_C) та між точками А, В, С і землею (U_{A0} , U_{B0} , U_{C0}). Результати занести в перший рядок табл. 7.2
3. Виміряти напругу між тими ж точками після замикання фази на землю. Результати занести в другий рядок табл. 7.2

Таблиця 7.2 – Експериментальні дані напруг

U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_A , В	U_B , В	U_C , В	U_{A0} , В	U_{B0} , В	U_{C0} , В

4. За допомогою вольтамперофазометра ВАФ-85 М виміряти струми I_A , I_B , I_C ; I_{A0} , I_{B0} , I_{C0} , а також струм $3I_0 = (I_A + I_B + I_C)$. Результати записати в перший рядок табл.7.3. За допомогою ВАФ-85 М виміряти також кути зсуву фаз між вказаними струмами і напругою U_{AB} . Результати записати в другий рядок табл.7.3.

5. Виконати аналогічні вимірювання після однофазного замикання на землю. Результати записати в третій і четвертий рядки табл.7.3.

6. Повторити вимірювання за п. 4 та 5 для мережі з компенсованою нейтраллю.

7. Повторити вимірювання за п. 4 та 5 для мережі з активним опором в нейтралі.

8. За результатами експериментів побудувати векторні діаграми напруг відносно землі та струмів для нормального режиму роботи і для

однофазного замикання на землю. Зробити висновки.

Таблиця 7.3 – Експериментальні дані струмів

Величина	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_a, A	I_b, A	I_c, A	$3I_0, A$
Діюче значення							
Кут зсуву фаз							
Значення після замикання							
Кут зсуву фаз після замикання							

Контрольні запитання

1. З якою метою проводяться дослідження режимів однофазного замикання на землю?
2. Який зсув фаз між напругою і струмом нульової послідовності для різних режимів нейтралі?
3. Як буде змінюватися струм нульової послідовності за наявності пошкоджень неконтрольованих приєднань?
4. Переваги та недоліки мереж з компенсованою нейтраллю.
5. Які переваги має ввімкнення активного опору в нейтраль?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИМИ УСТАНОВКАМИ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕГУЛЯТОРА РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ Б-2201

Мета роботи: вивчення загальних положень з керування *компенсувальними установками (КУ) (compensative plants)* в електричних мережах промислових підприємств та ознайомлення з регулятором Б-2201.

Теоретичні відомості

Компенсування реактивної потужності є найбільш ефективним засобом зниження втрат електроенергії в електричних мережах енергопостачальних компаній (ЕК) та споживачів. Для максимального зниження втрат необхідно на стадії проектування оптимально розмістити КУ в мережі, а в процесі експлуатації оптимально (за мінімумом втрат активної потужності) ними керувати. Потужність КУ та їх оптимальне розміщення визначається для режиму максимальних активних навантажень ЕК.

Для оптимального регулювання потужності КУ в усіх можливих режимах навантажень ЕК необхідні спеціальні автоматичні регулятори потужності КУ. При цьому вказана мета повинна досягатись за умови виконання таких вимог:

1. В період максимуму активних навантажень ЕК (зона "максимуму" при зонному обліку електроенергії) фактична вхідна реактивна потужність, яка споживається на вводах підприємства $Q_{\Phi 1}$ (максимум 30-ти хвилинного реактивного навантаження), повинна бути мінімальною (не повинна перевищувати потужності Q_{E1} , що рекомендується ЕК).

2. В період мінімуму активних навантажень ЕК (нічного "провалу" навантажень, зона "ніч") фактична вхідна реактивна потужність підприємства $Q_{\Phi 2}$ (середнє фактичне навантаження підприємства за період нічного "провалу") повинна дорівнювати величині потужності, що рекомендується ЕК Q_{E2} . У випадках, коли ЕК не задає спеціальних графіків споживання або генерування потужності споживача, останньому доцільно підтримувати в своїх мережах повне компенсування реактивної потужності.

3. В період позапікового електроспоживання (зона "день") доцільно використовувати КУ, які є в наявності, для зниження втрат електроенергії в мережах підприємства, тобто по можливості, звести споживання реактивної потужності з мережі ЕК до нуля, проводячи, таким чином, повне компенсування реактивної потужності в своїх мережах.

Опис регулятора

Регулятор реактивної потужності (*reactive power regulator*) типу Б-2201 призначений для автоматичного регулювання реактивної потужності, яка генерується КУ напругою 0,38 кВ. Регулювання відбувається дискретно шляхом увімкнення або вимкнення секцій КУ. Максимальна кількість секцій: шість або десять. Регулятор можна застосовувати і для керування декількома КУ, які встановлені на цеховій ТП.

Інформативним параметром регулятора (параметром регулювання) є поточне значення фактичної вхідної реактивної потужності $Q_{\text{Ф.вх.}}(t)$, яка споживається на ввіді окремого вузла розподільчої мережі споживача:

$$Q_{\text{Ф.вх.}}(t) = Q_{\text{Нав}}(t) - Q_{\text{КУ}}(t), \quad (8.1)$$

де $Q_{\text{Нав}}(t)$ – поточне значення потужності реактивного навантаження даного вузла; $Q_{\text{КУ}}(t)$ – поточне значення потужності КУ, яка ввімкнена в даний момент часу, в даному вузлі.

Для отримання інформативного параметра $Q_{\text{Ф.вх.}}(t)$ на входи автоматичного регулятора подається вимірюваний струм, пропорційний вхідному (для даного вузла) лінійному струму, та вимірювана напруга, пропорційна лінійній напрузі вузла, (в лабораторній роботі струму I_B та напрузі U_{CA}).

Регулятор забезпечує керування КУ в режимах повного та часткового компенсування. Режим повного компенсування використовується в години найбільших навантажень ЕК, а режим часткового компенсування – в години найменших навантажень. Вибір режиму здійснюється автоматично у відповідності з поточним значенням вимірюваного вхідного (для даного вузла) струму.

Уставка вимірюваного вхідного струму (вибору режиму компенсування) у відносних одиницях визначається за формулою:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{I_{\text{гр}}}{(I_{\text{ном}} \cdot K_{\text{мс}})}, \quad (8.2)$$

де $I_{\text{гр}}$ – граничне значення струму в первинній обмотці вимірювального трансформатора струму, при якому повинен здійснюватись перехід від одного режиму компенсування до іншого, тобто це значення струму, яке характеризує перехід від режиму мінімальних навантажень до режиму максимальних навантажень ЕК або навпаки;

$I_{\text{ном}}$ – номінальне значення струму вторинної обмотки вимірювального трансформатора струму;

$K_{\text{мс}}$ – коефіцієнт трансформації вимірювального трансформатора струму, який встановлений на ввіді вузла.

Уставка вибору режиму компенсування регулюється резистором " I/I_0 ". Якщо вимірюване поточне значення вхідного струму " I/I_0 " (у

відносних одиницях) більше від встановленого значення (уставки) " I/I_0 " на 5-10%, то регулятор працює в режимі повного компенсування. При зниженні вимірюваного поточного значення відносного вхідного струму " I/I_0 " менше від уставки " I/I_0 ", регулятор переходить в режим часткового компенсування. Якщо режим часткового компенсування не використовується, то резистор " I/I_0 " (а також резистор " Q/Q_0 ") слід встановити в крайнє ліве положення. В цьому випадку регулятор буде працювати тільки в режимі повного компенсування.

Резистор " Q/Q_0 " використовується для встановлення уставки за вхідною реактивною потужністю для годин найменших навантажень і регулюється в межах від 0,1 до 0,6 номінального значення вимірюваної вхідної реактивної потужності. Якщо вимірюване поточне значення відносної вхідної реактивної потужності Q/Q_0 більше від уставки " Q/Q_0 ", то відбувається увімкнення секції КУ. Якщо поточне значення Q/Q_0 менше від уставки " Q/Q_0 ", то секції КУ вимикаються. Уставка " Q/Q_0 " повинна вибиратись так, щоб на вході вузла виконувалась умова

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_{E2}}{(\sqrt{3} \cdot I_{ном} \cdot K_{тс} \cdot U_{ном} \cdot K_{тн})}, \quad (8.3)$$

де $U_{ном}$ – номінальна міжфазна вторинна напруга вимірювального трансформатора напруги, (якщо регулятор під'єднується безпосередньо до мережі 0,38 кВ, то $U_{ном}=380$ В);

$K_{тн}$ – коефіцієнт трансформацій вимірювального трансформатора напруги, при його відсутності $K_{тн}$ приймається рівним 1.

В режимі повного компенсування поточне значення Q/Q_0 порівнюється з нульовим значенням уставки за вхідною реактивною потужністю.

Для уникнення частих перемикань секцій КУ в регулятор введена зона нечутливості. Практично це означає, що ввімкнення (вимкнення) секцій КУ здійснюється при дещо відмінних значеннях параметра регулювання від уставки. Зона нечутливості регулятора Б-220І залежить від значення потужності найменшої секції КУ і регулюється в межах від 0,02 до 0,24 номінального значення вимірюваної вхідної реактивної потужності. Межа зони нечутливості встановлюється резистором $\Delta Q/Q_0$.

Уставка межі зони нечутливості у відносних одиницях визначається за формулою:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{1,5 \cdot Q_c}{(\sqrt{3} \cdot I_{ном} \cdot K_{тс} \cdot U_{ном} \cdot K_{тн})} \quad (8.4)$$

де 1,5 – коефіцієнт запасу; Q_c – потужність найменшої секції КУ.

З цією ж метою введена також витримка часу на ввімкнення (вимкнення) секцій КУ. Величина витримки часу залежить від величини перевищення сигналом розгалуження (між фактичним значенням вхідної реактивної потужності та її уставкою). Межа зони нечутливості змінюється від 3 до 180 секунд.

Регулятор має світлову індикацію наявності команд на ввімкнення і вимкнення секцій КУ та індикацію кількості ввімкнених секцій. Передбачене ручне керування увімкненням (вимкненням) секцій. Контакти регулятора забезпечують комутацію кіл змінного струму напругою 220 В зі струмом ввімкнення 2,5 А.

Розрахунок уставок регулювання

Значення уставки струму рекомендується вибирати таким, щоб у години найбільшого навантаження вимірюваний струм на вході регулятора був більшим від уставки на 0,7А, а в години найменшого навантаження – меншим від уставки на 0,2 А. Отже, I_{zp} вибирається таким, щоб його значення було:

- менше від найменшого значення струму, який тільки може бути в нормальному режимі споживача за весь період часу найбільших навантажень, на $0,7 K_{mc}$ (А);
- більше від найбільшого значення струму, який тільки може спостерігатись в нормальному режимі споживача за весь період часу найменших навантажень, на $0,2 K_{mc}$ (А).

З цих значень для подальшого розрахунку приймається менше. Наприклад, при використанні трансформатора струму 1000/5 ($K_{mc} = 200$) та коливаннях струму в межах 900 – 700А в години найбільших навантажень, та в межах 200 – 400А в години найменших навантажень, граничне значення струму буде:

- в години найбільших навантажень $I_{zp}' = 700 - 0,7 \cdot 200 = 560$ А;
- в години найменших навантажень $I_{zp}'' = 400 + 0,2 \cdot 200 = 440$ А.

Таким чином, $I_{zp} = I_{zp}'' = 440$ А. Отже, для правильної роботи регулятора різниця між найменшим значенням струму в години найбільших навантажень та найбільшим значенням струму в години найменших навантажень повинна бути не меншою за $0,9 \cdot K_{mc}$ (А).

Вимоги до звіту

У звіті повинні бути відображені такі питання:

- 1) Загальні положення щодо керування КУ;
- 2) Загальні відомості про регулятор Б-2201;
- 3) Схема під'єднання регулятора до мережі;
- 4) Структурна схема регулятора та її опис;

- 5) Результати перевірки працездатності;
- 6) Результати розрахунку уставок регулювання у відповідності зі своїм варіантом (таблиця. 8.1).

Таблиця. 8.1 – Варіанти завдань для розрахування уставок

№ варіанта	Межі коливання струму для режиму		Трансформатор струму	Трансформатор напруги	Величина Q_{E2} , квар	Величина Q_C , квар
	Найбільших навантажень	Найменших навантажень				
1	3 – 5	15 – 20	20/5	-	50	13
2	10 – 20	35 – 45	50/5	-	50	18
3	30 – 40	70 – 90	100/5	-	100	25
4	70 – 90	160 – 190	200/5	-	100	50
5	120 – 150	270 – 290	300/5	-	150	50
6	220 – 250	550 – 580	600/5	-	200	75
7	280 – 300	700 – 780	1000/5	-	200	75
8	320 – 350	1300 – 1400	1500/5	-	200	75
9	400 – 500	1600 -1800	2000/5	-	250	75

Хід роботи

1. Виставте ручки ЛАТрів та перемикач "Активне навантаження" у крайнє ліве положення, а тумблер "Б-2201" в нижнє положення.

2. Подайте живлення на стенд.

3. Подайте живлення на регулятор Б-2201, встановивши тумблер "Б-2201" у верхнє положення.

4. Виконайте перевірку справності регулятора.

4.1 Перейдіть до режиму ручного регулювання. Для цього короткочасним натисканням відповідної кнопки зафіксуйте її.

4.2 Натисніть кнопку " + " і тримайте її в такому положенні. При цьому повинен засвітитись індикатор " + " і з витримками часу початись увімкнення секції КУ. При ввімкненні чергової секції спостерігайте (за фазометром) зниження вхідної реактивної потужності та збільшення cosφ. Одночасно спостерігайте за правильністю роботи світлової індикації та кількістю ввімкнених секцій КУ.

4.3 Відпустіть кнопку " + " і натисніть кнопку " – " та тримайте її в такому положенні. При цьому повинен засвітитись індикатор " – " і з витримками часу початись увімкнення секції КУ. При вимкненні чергової секції спостерігайте (за фазометром) збільшення вхідної реактивної

потужності та зменшення $\cos\varphi$. Одночасно спостерігайте за правильністю роботи світлової індикації кількості ввімкнених секцій КУ. Досягайте вимкнення всіх секцій.

4.4 Перейдіть до режиму автоматичного регулювання.

4.5 Вимкніть живлення регулятора Б-2201, встановивши тумблер "Б-2201" у нижнє положення.

4.6 Встановіть резистори " I/I_0 ", " Q/Q_0 " та " $\Delta Q/Q_0$ " в крайнє лівє положення.

4.7 Виставте за допомогою ЛАТрів струм у кожній фазі рівний 1,5 А, що відповідає $\cos\varphi = 0.5$.

4.8 Подайте живлення на регулятор Б-2201, встановивши тумблер "Б-2201" у верхнє положення.

4.9 При індуктивному характері навантаження спостерігайте за ввімкненням секцій КУ. Якщо потужність КУ достатня для повного компенсування, то повинен виникнути коливальний процес "увімкнення/вимкнення" секцій КУ. Результати спостережень записуємо в таблицю.8.2.

Таблиця 8.2 – Результати спостережень

Поточний час	Витримка часу Δt , с	Вид комутації	Номер секції КУ	I_B , А	$\cos\varphi$

4.10 Встановіть резистор " $\Delta Q/Q_0$ " в крайнє праве положення і спостерігайте за припиненням коливального процесу.

4.11 Встановіть спочатку резистор Q/Q_0 , а потім резистор " I/I_0 " в крайнє праве положення. Якщо при цьому вхідний струм менший від $0,7 \cdot I_{ном}$, то повинен засвітитись індикатор " – ", а секції КУ почнуть вимикатись.

4.12 Вимкніть живлення на регуляторі Б-2201, встановивши тумблер "Б-2201" у нижнє положення.

4.13 Вимкніть живлення стенда.

5. Виконайте розрахунок уставок у відповідності зі своїм варіантом, та встановіть їх на регуляторі.

5.1 Встановіть перемикач "Активне навантаження" в крайнє праве положення (імітуючи режим найбільших навантажень).

5.2 Подайте живлення на стенд.

5.3 Подайте живлення на регулятор Б-2201, встановивши тумблер "Б-2201" у верхнє положення.

5.4 Спостерігайте за режимом повного компенсування реактивної потужності.

5.5 Встановіть перемикач "Активне навантаження" в крайнє ліве положення (імітуючи режим найменших навантажень).

5.6 Спостерігайте за режимом часткового компенсування.

5.7 Вимкніть живлення регулятора Б-2201, встановивши тумблер "Б-2201" у нижнє положення.

6. Вимкніть живлення стенда.

Контрольні запитання

1. Призначення та галузь використання автоматичного регулятора конденсаторних батарей Б-2201?

2. За рахунок чого одержують додатковий ефект (додаткове зниження втрат електроенергії) при оптимальному керуванні КУ?

3. Як визначається режим навантажень для перемикачя уставок регулювання параметра?

4. Як працює витримка часу на ввімкнення (вимкнення) секцій КУ?

5. Як формуються команди комутації секцій КУ?

6. Як здійснюється сигналізація ввімкнення (вимкнення) секцій КУ?

7. Як здійснюється під'єднання регулятора до мережі?

8. Порядок перевірки дієздатності регулятора?

9. Для чого в регулятор введена зона нечутливості?

10. Як визначається уставка межі зони нечутливості?

11. Як визначається уставка вимірюваного вхідного струму?

12. Як визначається регульована уставка параметра регулювання в режимі часткового компенсування?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ

Мета роботи: Усвідомити принцип дії вакуумних вимикачів. Засвоїти особливості конструкції дугогасильної системи вакуумних вимикачів. Ознайомитись з принципами дії і конструкцією привода та приводного механізму вакуумних вимикачів. Набути навичок дослідження схем керування вакуумними вимикачами.

Теоретичні відомості

Вакуумні дугогасильні камери

Вакуумні вимикачі складаються з вакуумних дугогасильних камер, приводів з приводними механізмами і схем керування. Вакуумні дугогасильні камери є найважливішою частиною вимикачів, що визначають їхні технічні характеристики.

У вакуумних дугогасильних камерах відбуваються комутації – процеси замикання і розмикання електричних кіл. У цих камерах забезпечується глибокий вакуум, що характеризується тиском залишкових газів 10^{-2} — 10^{-4} Па.

Принцип дії вакуумних дугогасильних камер оснований на гасінні електричної дуги струму вимкнення у вакуумі. У вакуумних дугогасильних камерах реалізуються дві дуже важливі властивості вакуумних проміжків між електродами: висока електрична міцність (вища, ніж трансформаторного масла, не говорячи вже про повітря) і висока дугогасильна здатність.

У глибокому вакуумі дугогасильної камери вимикача довжини вільного пробігу молекул і електронів складають десятки, а то й сотні метрів, тобто на багато більше, ніж відстань між контактами вимикача. Тому ударна іонізація у вакуумному проміжку практично відсутня і вакуумний проміжок не може служити джерелом вільних зарядів. Заряджені частки можуть з'явитися лише за певних умов з поверхонь контактів та інших частин вакуумної камери (рис. 9.1).

Процес вимикання відбувається у такий спосіб. При розмиканні контактів 2 і 3 кількість контактних точок між ними зменшується, а щільність струму, що протікає через контактні точки, зростає. У результаті цього, на завершальній стадії розмикання відбувається розплавлення і випаровування матеріалу контактів (рис. 9.2). У парах металу виникає електричний розряд, що переходить у дугову стадію. Завдяки низькому тиску в камері навколо контактів відбувається інтенсивна дифузія дугового стовпа і дуга гасне. Частки матеріалу контактів, що випарувались, осідають на поверхнях вакуумної камери. При цьому

швидко (за 5–50 мкс) відновлюється електрична міцність між контактами. Швидкість відновлення електричної міцності у вакуумних вимикачах вища, ніж у всіх інших типах вимикачів. У процесі виготовлення камери для видалення газу із внутрішніх поверхонь вакуумної камери, останню піддають тривалій дегазації у вакуумі при температурі кілька сотень градусів Цельсія і безмасляній вакуумній відкачці газу. Завдяки цьому, поверхні камери не тільки не виділяють газу в порожнину, а, навпаки, відсмоктують невелику кількість газу, що утворюється під час горіння дуги.

Характеристика вимикача значно залежить від матеріалу контактів. Для виготовлення контактів застосовують сплави міді з невеликим вмістом вісмуту, заліза й бору. Ці сплави відрізняються більш високою електро- і теплопровідністю в порівнянні з тугоплавкими матеріалами, що застосовували раніше, наприклад, вольфрамом. При використанні тугоплавких матеріалів при комутації контактів у газоподібний стан переходить менша кількість речовини, тому дуговий стовп розпадається швидше.

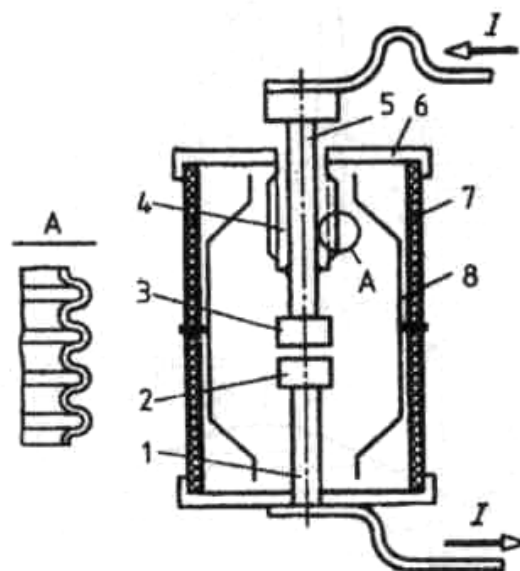


Рисунок 9.1 – Пристрій дугогасильної вакуумної камери:

1,5 – струмовводи, 2 – нерухомий контакт, 3 – рухомий контакт, 4 – сильфон, 6 – металевий фланець, 7 – корпус з ізоляційного матеріалу, 8 – екран

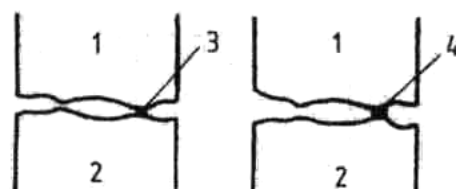


Рисунок 9.2 – Схематична картина утворення дуги у вакуумі при розходженні контактів (1,2 – контакти, 3 – місток з розплавленого металу, 4 – дуговий розряд)

Але у цьому випадку, при вимкненні малих індуктивних струмів, гасіння дуги можливе при струмі i_0 (рис. 9.3) до моменту переходу струму через нуль. Відбувається „зріз” струму i_0 , що викликає перенапругу на устаткуванні і може призвести до небажаних наслідків. Тому застосування для контактів сплаву міді дозволяє запобігти перенапрузі в колі, яке вимикається. Для захисту ізоляційних поверхонь камери від забруднення продуктами ерозії контактів встановлюють спеціальні екрани 8 (див. рис. 9.1). Завдяки тому, що контакти знаходяться у глибокому вакуумі, вони не окислюються, чим досягається їх висока зносостійкість. Вони працюють без обслуговування протягом усього терміну служби камери.

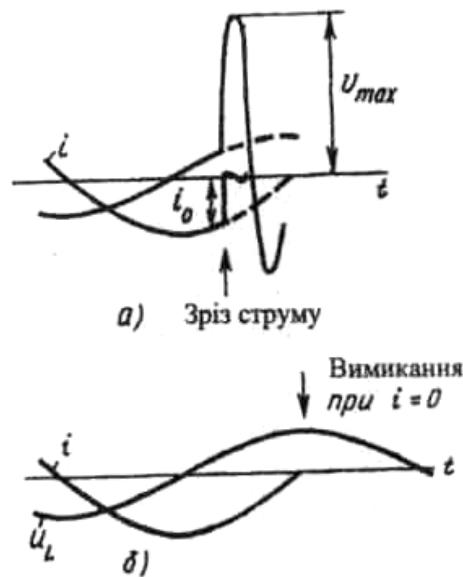


Рисунок 9.3 – Розвиток перенапруги при „зрізі” струму при індуктивному навантаженні:

а – „зріз” струму (перенапруги при індуктивності до U_{\max}); б – вимкнення при $i = 0$ (перенапруги немає)

Завдяки високій електричній міцності вакуумних проміжків хід рухомих контактів невеликий, у межах 10—20 мм, у той час, коли хід контактів у мало-масляних вимикачах (з тими ж параметрами, що й вакуумні вимикачі), принаймні в 10 разів більший (близько 200 мм у вимикачі типу ВМП-10).

Струмові характеристики вакуумних вимикачів визначаються роботою контактної системи, тому що при комутаціях відбувається ерозія контактних поверхонь. Вона тим більша, чим більший струм, який вимикають, більша тривалість горіння дуги, нижча температура плавлення матеріалу контактів і гірше тепловідведення.

Щоб швидше загасити дугу, необхідна висока швидкість пересування рухомого контакту при розмиканні й замиканні. Така необхідність при замиканні викликана тим, що при зближенні контактів перед замиканням відбувається пробій міжконтактного проміжку з

переходом його в дугу так само, як і при розмиканні. При повільному зближенні контактів тепловиділення збільшується і може виникнути оплавлення контактів, а також виникають умови для небажаної вібрації контактів після замикання, яку називають деренчанням контактів.

Протягом усього терміну експлуатації вимикача необхідно підтримувати високий рівень вакууму. Практично дугогасильна камера має бути абсолютно герметичною. Тому для з'єднання елементів камери застосовують тільки зварювання або пайку твердим припоєм. Герметичність камери при переміщенні рухомого контакту забезпечується сильфоном 4 (див. рис. 9.1), що вакуумно щільно зв'язаний з струмовводом 5 рухомого контакту та фланцем 6 камери. Вакуумні дугогасильні камери розроблені на номінальні напруги 10 і 35 кВ, номінальні струми від 120 до 3200 А і номінальні струми вимкнення від 10 до 31,5 кА.

На рис. 9.4 приведена камера типу КДВ-10-31,5/3200 (камера дугогасильна, вакуумна, з номінальною напругою 10 кВ, номінальним струмом вимкнення 31,5 кА і номінальним струмом КРУ 3200 А).

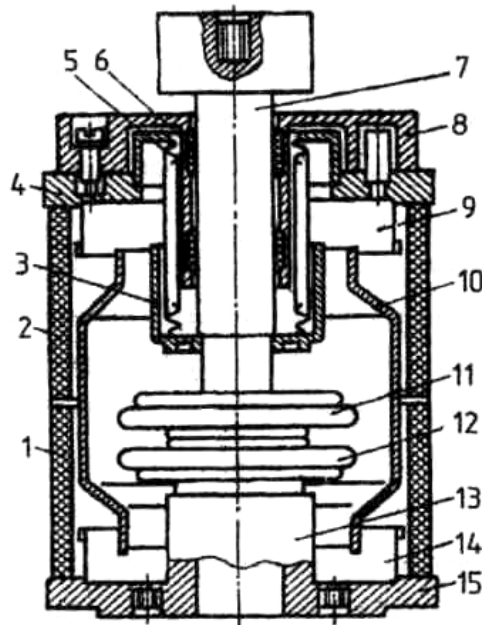


Рисунок 9.4 – Дугогасильна камера типу КДВ – 10-3105, 5/3200:

1,2 – керамічні ізолятори корпусу камери; 3, 9,10,14 – екрани; 4,15 – фланці; 5 – сильфон; 6 – напрямний пристрій; 7,13 – струмовводи; 8 – напрямний фланець, що забезпечує співвісність контактів; 11 – рухомий контакт; 12 – нерухомий контакт

Корпус камери складається з двох секцій, що утворені циліндричними керамічними ізоляторами 1, 2, вакуумно-щільно закритими металевими фланцями 4, 15. Між секціями закріплений захисний екран 10. Крім того, є ще два екрани 9, 14, які встановлені біля фланців 4, 15. Екран 14 захищає сильфон 5 від випадкового пропалювання його дугою. У корпусі камери 1 підтримується вакуум, не менший 10^{-2} Па протягом усього періоду експлуатації. Це досягається за рахунок дуже високого

ступеня герметичності і спеціальної вакуумно-технологічної обробки камери при виготовленні. Усередині корпуса знаходяться контакти: рухомий 11 і нерухомий 12. Вони закріплені на струмовводах 7, 13. Осьові переміщення рухомого електрода забезпечуються сильфоном 5. Він вакуумно-щільно з'єднаний з рухомим струмовводом 7 і фланцем корпуса 8. Цей фланець забезпечує співвісність контактів за допомогою спеціального напрямного пристрою 6. Приєднання камери до силового електричного кола напругою 10 кВ здійснюється за допомогою розеточних контактів. Механізм приводу закріплений з боку нерухомого струмовводу.

Приводи і приводні механізми вакуумних вимикачів

Пересування рухомих контактів вакуумних вимикачів здійснюється за допомогою приводу. Для цього, як правило, застосовують електромагнітні приводи. Вони перетворюють електромагнітну енергію магнітної системи в кінетичну енергію. Від приводу ця енергія передається до рухомих контактів за допомогою приводного механізму.

Привод і приводний механізм вакуумних вимикачів мають свої особливості. Завдяки малому ходу рухомого контакту та його порівняно невеликій масі привод і електромагнітні приводні механізми (рис. 9.5) вакуумних вимикачів легкі, компактні й економічні.

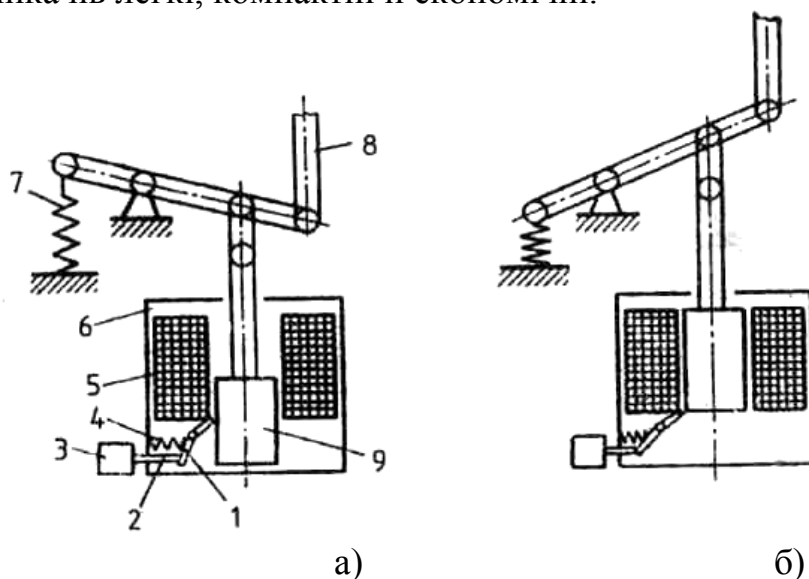


Рисунок 9.5 – Схема електромагнітного приводу:

а – вимикач вимкнено, б – вимикач увімкнено;

1 – засувка; 2 – бойок; 3 – електромагніт вимкнення; 4 – пружина засувки; 5 – обмотка електромагніта ввімкнення; 6 – ярмо електромагніта;

7 – пружина вимкнення; 8 – тяга; 9 – якор електромагніта ввімкнення

Електромагнітний привод працює так: при подачі напруги на обмотку 5 електромагніту, його якор 9 втягується в електромагніт і відбувається ввімкнення вимикача та стиснення пружини вимкнення 7. У ввімкненому стані вимикач утримується засувкою 1, яка відтягується пружиною 4. При вимиканні подають живлення на електромагніт 3, при

цьому бойок 2 ударяє по засувці 1, і вона зіскакує з упору. Пружина вимкнення 7 здійснює вимикання вимикача, при цьому якір 9 електромагніту ввімкнення опускається вниз.

Реальні пристрої електромагнітних приводів ускладнюються введенням додаткових елементів – покажчиків положення, допоміжних контактів, допоміжних пружин, обмежувачів ходу рухомого контакту, електроізоляційних проміжків, механізмів вільного розчіплювання і ін. Вимикачі обладнані механізмом вільного розчіплювання, який роз'єднує рухомі контакти вимикача з приводом. Завдяки цьому механізму пружини вимкнення не можуть вимкнутися вимикач, коли електромагніт увімкнення знеструмлений. З іншого боку, механізм вільного розчіплювання забезпечує від'єднання вимикача від пристроїв автоматики тільки за умови, що вимикач знаходиться в увімкненому стані. Пристрій механізму вільного розчіплювання показано на рис. 9.6 (на прикладі вимикача типу ВВ-10-2/320), де позначено: 1 – якір електромагніту ввімкнення, 2 – обмотка електромагніту ввімкнення, 3 – засувка, 4 – ролик, 5 – ланка, 6 – передача на замикання-розмикання допоміжних контактів вимикача, 7 – механізм ламких важелів, 8 – ланка, 9 – тяга, 10 – пружина вимкнення, 11 – допоміжний вал, 12 – буферна пружина, 13 – головний вал, 14 – дугогасильна камера, 15 – пружина підтискування, 16 – важіль-ізолятор, 17 – механізм ламких ланок, 18 – електромагніт вимкнення.

При увімкненні вимикача (див. рис. 9.6, а) подається живлення на обмотку електромагніту 2, при цьому якір електромагніту піднімається вгору, його штовхальник ударяє по ролику 4, що піднімається вгору, ковзаючи по поверхні підпружиненої засувки 3. Засувка спочатку відсувається вліво, повертаючись навколо своєї осі, а наприкінці ходу якоря заскакує під ролик, утримуючи механізм в увімкненому положенні.

При підйомі ролика ланка механізму 5 обертається за годинниковою стрілкою переміщуючи тягу 9 ліворуч, внаслідок чого допоміжний вал 11 обертається за годинниковою стрілкою, а головний вал 13 – проти годинникової стрілки, важіль-ізолятор 16 піднімає рухомі контакти трьох дугогасильних камер вгору. Наприкінці процесу ввімкнення допоміжні контакти за допомогою важеля з тягою 6 розривають коло електромагніту ввімкнення і якір разом із штовхальником займає своє нижнє положення.

Вимикання здійснюється за допомогою електромагніту вимкнення 18 (див. рис. 9.6, б), якір якого своїм штовхальником ударяє по ланці механізму ламких важелів 17 і змушує важіль, що складається з окремих ланок, зламатися. При цьому Г-подібна ланка 5 механізму вільного розчіплювання повертається проти годинникової стрілки, змушуючи вісь ролика 4 зіскочити з засувки під дією пружин вимкнення 10, що діють на головний вал 13, ролик падає вниз уздовж внутрішнього вирізу засувки, а важелі-ізолятори 16 відходять униз, переміщуючи рухомий контакт униз. Вимикач вимикається. Блок-контакти розмикають коло електромагніту

вимкнення, якір повертається на попереднє місце, дозволяючи механізму ламких важелів зайняти вихідне положення для виконання операції увімкнення. Ручне вмикання вимикача здійснюється за допомогою кнопки, що діє безпосередньо на механізм ламких ланок. Хід контактів при вимкненні обмежується буферним пристроєм 12.

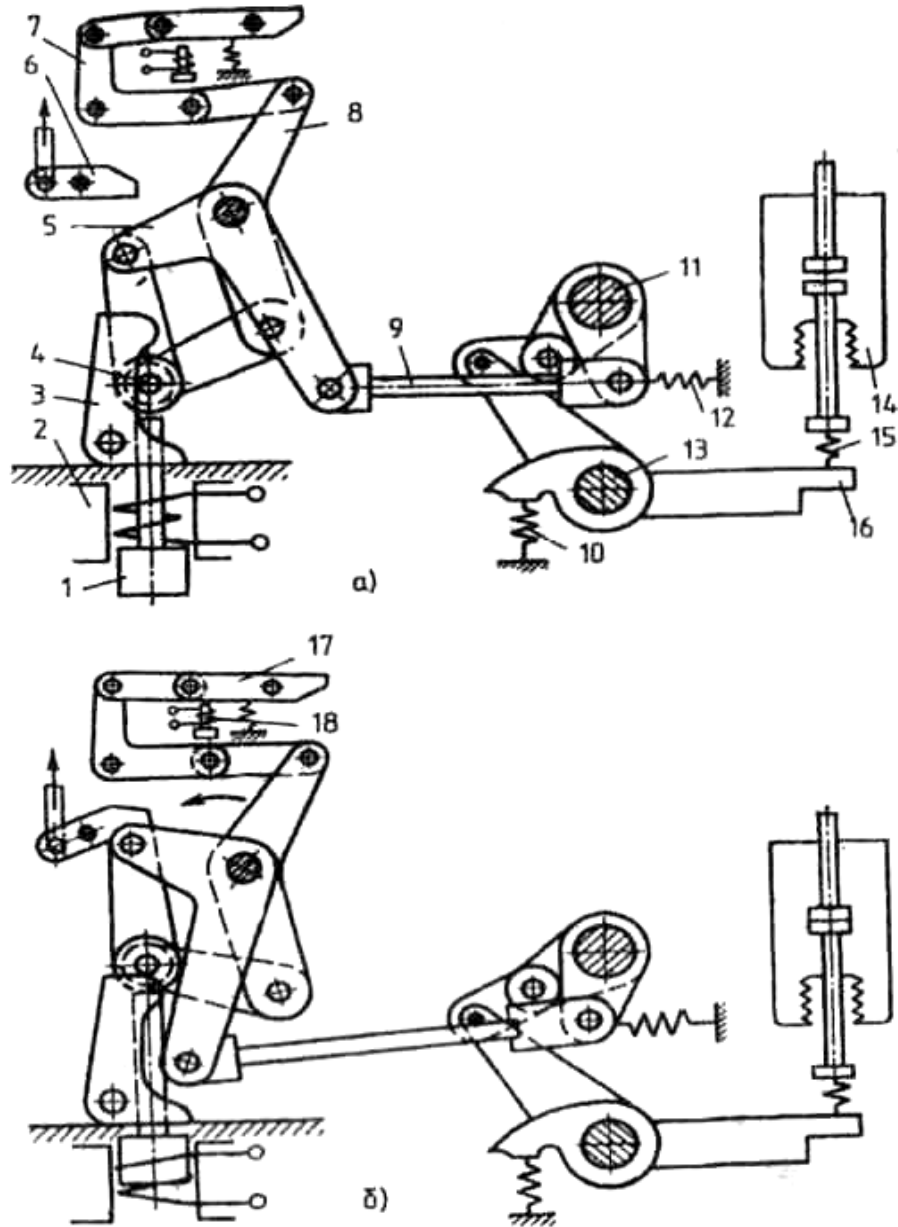


Рисунок 9.6 – Механізм вільного розчіплювання:

а – при вимкненому стані вимикача, б – при увімкненому стані вимикача

Вузол дотискування і вивід рухомого контакту з дугогасильної камери показано на рис. 9.7. Під час увімкнення вимикача важіль-ізолятор 10 діє на струмоввід рухомого контакту 6 камери через пружину підтискування 1, спеціальну гайку 2 і тягу 4. Пружина підтискування 4 зм'якшує удар важеля-ізолятора по рухомому контакту при ввімкненні, а в

увімкненому стані забезпечує підтискування контактів вимикача. Хід рухомого контакту зі струмовводом 6 складає 4—5 мм.

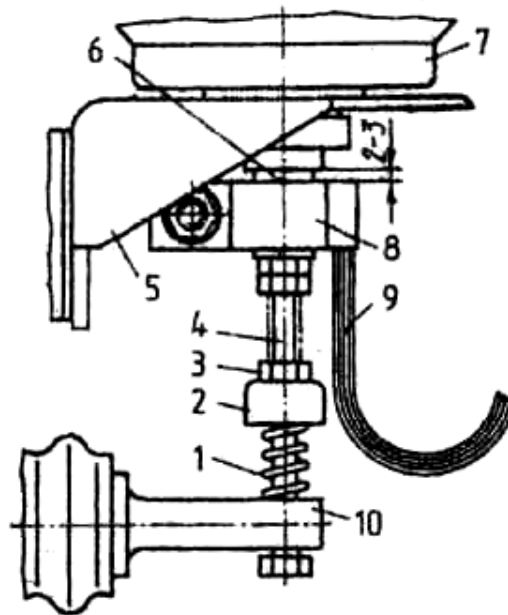


Рисунок 9.7 – Вузол дотискування і вивід рухомого контакту (стан вимикача "ввімкнено")

Хід роботи

1. Вивчити принцип дії і конструкцію вакуумного вимикача, користуючись оснащенням робочого місця.
2. Розглянути стадії гасіння електричної дуги в дугогасильній камері при вимкненні вимикачем головного кола.
3. Визначити особливості гасіння дуги при різних значеннях струму, що розривається.
4. Ознайомитись з особливостями конструкції електропривода вакуумного вимикача.
5. Засвоїти призначення і принцип дії механізму вільного розчіплювання.
6. Ознайомитись з електричними характеристиками вакуумних вимикачів, які покладено в основу їх вибору при проектуванні підстанцій.
7. Оформити звіт.

Контрольні запитання

1. З яких основних елементів складається вакуумний вимикач?
2. На якому принципі заснована дія дугогасильної камери у вакуумних вимикачах?
3. Назвіть найважливіші властивості вакуумних дугогасильних камер?
4. За рахунок яких процесів відбувається гасіння дуги у вакуумних дугогасильних камерах?

5. Чому у вакуумних дугогасильних камерах не використовують контакти з тугоплавких матеріалів?
6. Наведіть стадії вимкнення струму у вакуумних вимикачах?
7. Для якої мети в дугогасильній камері вакуумних вимикачів встановлено екран?
8. Чим забезпечується висока зносостійкість контактів вакуумних вимикачів?
9. За рахунок чого у вакуумних вимикачах досягається малий хід рухомих контактів?
10. Який елемент вакуумного вимикача забезпечує вакуум при переміщенні рухомого контакту?
11. Які електроприводи використовують для керування вакуумними вимикачами?
12. З якою метою у вакуумних вимикачах використовують механізм вільного зчеплення?
13. Яку роль відіграє пружина дотискування приводного механізму при комутації вакуумного вимикача?

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАХИСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАВКИХ ЗАПОБІЖНИКІВ ТА АВТОМАТИЧНИХ ВИМИКАЧІВ

Мета роботи: засвоїти основні поняття, що стосуються *плавких запобіжників (safeties fuse)* та *автоматичних вимикачів (circuit breakers)*, побудувати захисні характеристики.

Теоретичні відомості

Для захисту окремих елементів розподільчих мереж до 1000 В переважного застосування набули плавкі запобіжники та автоматичні вимикачі. Плавкий запобіжник складається з металевої плавкої вставки, контактної частини та корпусу. Принцип роботи запобіжника базується на нагріванні плавкої вставки до температури плавлення металу і перегорання плавкої вставки. При цьому ділянка, що захищається, по якій протікає значний струм, від'єднується від джерела живлення.

Розрізняють номінальний струм запобіжника та номінальний струм плавкої вставки. Номінальним струмом запобіжника вважається струм, на який розраховані струмопровідні та контактні частини, а номінальним струмом плавкої вставки є струм, на який розрахована сама плавка вставка. При тривалому протіканні номінального струму плавка вставка запобіжника не повинна перегорати.

Час вимкнення кола плавким запобіжником залежить від металу, з якого виготовлено плавку вставку, температури її нагрівання, а також від типу пристрою для гасіння дуги. Плавкі вставки запобіжників виготовляють з свинцю, сплавів свинцю з оловом, цинку, алюмінію, міді, срібла та деяких інших металів. Мідь та срібло мають високу електропровідність. Температура плавлення їх достатньо висока (відповідно, 1080 та 960°C). Переріз таких вставок доволі малий.

Крива залежності перегорання плавкої вставки запобіжника від значення струму називається захисною або часово-струмовою характеристикою. В табл. 10.1 наведені наближені значення струмів плавлення плавких вставок різних перерізів, які виготовлені з різних металів.

Автоматичні вимикачі (автомати) використовують в установках змінного та постійного струму. Вони мають спеціальні пристосування для автоматичного вимкнення електричного кола при коротких замиканнях, перевантаженнях, або при коротких замиканнях та перевантаженнях одночасно. Автоматичний вимикач замінює два простіших апарата – рубильник та запобіжник.

Таблиця 10.1 – Значення струмів плавлення плавких вставок різних перерізів

Значення струму, А	Свинець	Сплав 75% свинцю, 25% олова	Мідь	Залізо
1	0,21	—	0,05	0,12
2	0,33	—	0,09	0,19
3	0,43	—	0,11	0,25
4	0,52	—	0,14	0,30
5	0,60	0,62	0,16	0,42
10	0,95	0,96	0,25	0,55
15	1,85	1,28	0,33	0,72
20	1,54	1,56	0,43	0,87
25	1,76	1,80	0,46	1,01
30	1,98	2,04	0,52	1,15

Основними параметрами автоматичних вимикачів є номінальний струм, напруга та граничний струм вимкнення. Номінальним струмом автоматичного вимикача називається найбільший струм, при якому вимикач може працювати протягом тривалого часу. Номінальна напруга вимикача дорівнює напрузі мережі, для роботи в якій він призначений. Номінальним граничним струмом вимкнення називається найбільший струм, який вимикач здатний вимкнути в аварійному режимі без його пошкодження. Номінальним струмом розчіплювача називається найбільший струм, тривале проходження якого ще не викликає спрацювання розчіплювача.

В кожному автоматичному вимикачі використовується один або декілька розчіплювачів. За принципом дії, способом виявлення аварійної ситуації і призначенням розрізняють електромагнітні, теплові, та напівпровідникові розчіплювачі.

Електромагнітні розчіплювачі здійснюють миттєве вимкнення, тобто виконують функцію відсічки без витримки часу. Основним призначенням розчіплювача є вимкнення КЗ. Щоб запобігти вимкненням автомата при короткочасних перевантаженнях, що є небезпечним для установки, встановлюють струм вимкнення автомата більшим від можливих короткочасних піків струму навантаження.

Теплові розчіплювачі призначені для захисту електрообладнання від струмів перевантаження і віддалених КЗ. Тепловий розчіплювач має біметалеві пластинки з двох металів з різними температурними коефіцієнтами розширення, які ввімкненні в кожен полюс вимикача. При нагріванні кожна пластинка вигинається і своїм не закріпленим

кінцем діє на механізм вільного розчіплювання, викликаючи вимкнення вимикача.

Тепловий розчіплювач розрахований на проходження струму рівного його номінальному струмові протягом, як завгодно, тривалого часу. Розчіплювач спрацьовує, якщо струм перевищує його номінальне значення на 15 – 35%, але при цьому час спрацювання складає хвилини, що і є першим принциповим недоліком теплового розчіплювача. Другим недоліком є великий вплив змін температури середовища на точність роботи теплового розчіплювача за струмом і за часом. Теплові розчіплювачі, як правило, використовуються разом з електромагнітними. Такі розчіплювачі називають комбінованими. Автоматичні вимикачі з комбінованими розчіплювачами застосовуються для захисту окремих електроприймачів (електродвигунів та ін.).

Захисні характеристики автоматичних вимикачів з комбінованим розчіплювачем зображено на рис. 10.1.

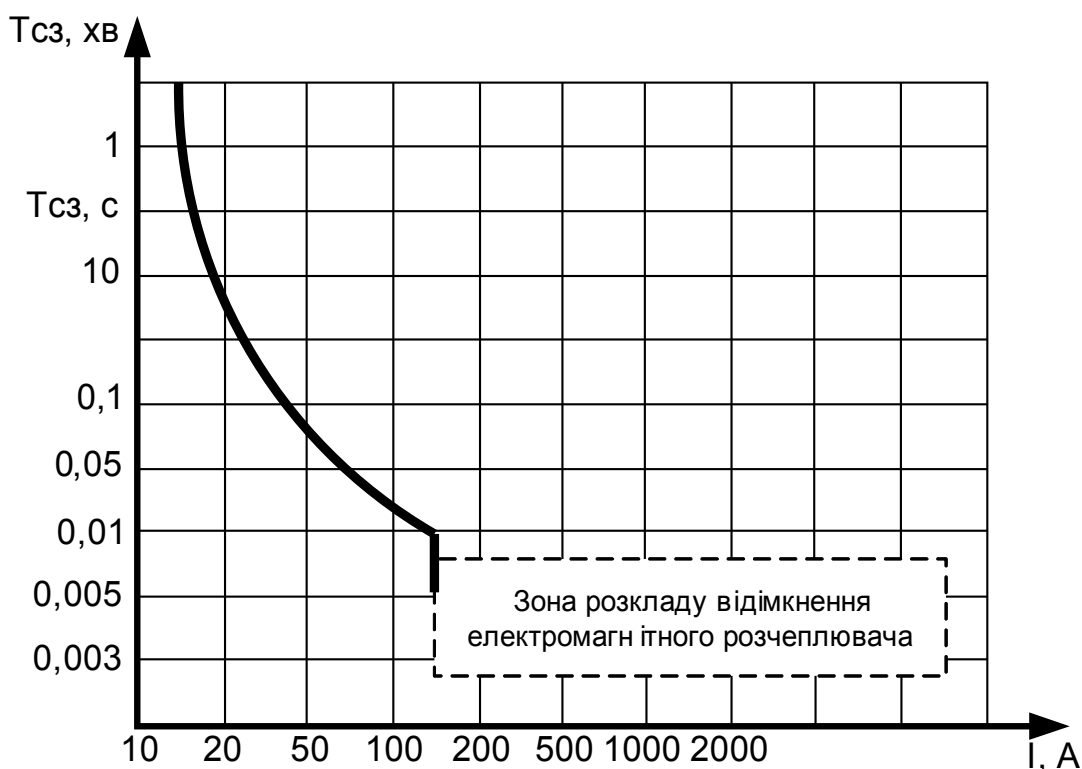


Рисунок 10.1 – Захисні характеристики автоматичних вимикачів

В деяких типах сучасних вимикачів серії А-3700, ВА замість теплових розчіплювачів встановлюються регульовані напівпровідникові розчіплювачі. Напівпровідникові розчіплювачі мають обернено залежну часово-струмову характеристику для захисту від перевантаження і швидкодіючий захист (відсічку) від струмів КЗ.

Для швидкого і надійного вимкнення однофазних КЗ у вимикачах серії ВА є спеціальний струмовий захист нульової послідовності, який

більш чутливий до струмів однофазного КЗ. Вставки захисту від перевантаження, струмової відсічки, часу спрацювання регулюються. Для автоматичних вимикачів серії ВА струм спрацювання відсічки може бути встановлений рівним 3, 5, 7 або 10-кратним від номінального струму вимикача. Для селективних вимикачів цієї серії витримка часу спрацювання відсічки встановлюється рівною 0,1; 0,2 або 0,3 с, а час спрацювання захисту від перевантаження встановлюється – 4, 8, 16 с при $6 I_{нр}$.

Опис лабораторного стенда і порядок виконання роботи

Лабораторний стенд для зняття захисних характеристик запобіжників (автоматів) складається з лабораторного автотрансформатора (АТ), який дозволяє плавно змінювати значення вхідної напруги навантажувального трансформатора (Т) і таким чином регулювати значення струму. Фіксування часу перепалювання виконується електричним секундоміром, запуск і зупинка якого виконується нормально замкнутим контактом струмового реле КА.

Для зняття ампер-секундних характеристик запобіжників (автоматів) необхідно:

- 1.Зібрати схему, яка зображена на рис. 10.2, і подати її на перевірку викладачу.
- 2.Після перевірки схеми викладачем, подати напругу на схему автоматичним вимикачем (АВ).
- 3.Під'єднати запобіжник (автомат), ЛАТРом виставити струм 25 А і за допомогою секундоміра визначити час перепалювання плавкої вставки (час спрацювання автомата) при цьому струмі. (За час охолодження автомата С10 АСКО, провести аналогічний дослід з автоматами С10 ДЭК та С6 ДЭК.)
- 4.За допомогою ЛАТРа по чергово подати струми 20 А і 15 А та визначити час спрацювання цих же запобіжників (автоматів).
- 5.Виміряні дані занести до табл. 10.2.
- 6.Зробити висновки, побудувати графічні залежності $t_{спр} = f(I)$ для запобіжника та автомата.

Таблиця 10.2 – Час спрацювання автоматів при різних струмах

№ досл.	I (А)	Час спрацювання (t_{c^*})		
		С10АСКО	С10ДЭК	С6ДЭК
1				
2				
3				

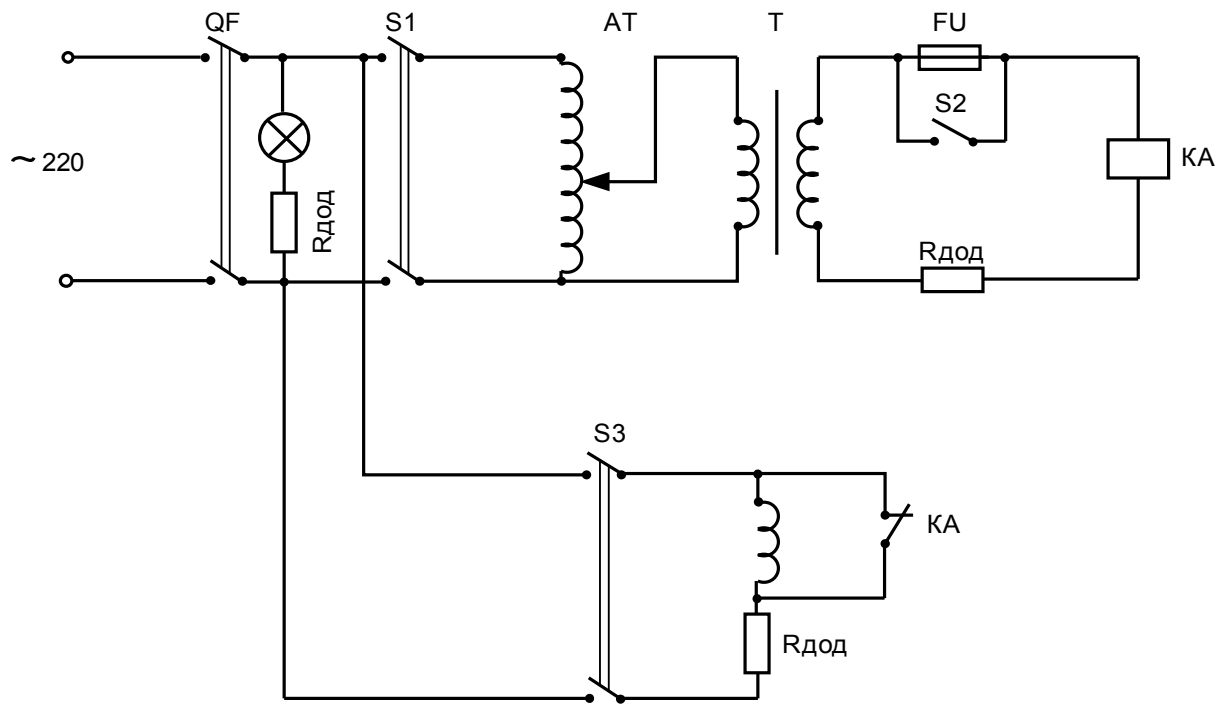


Рисунок 10.2 – Схема дослідної установки

УКРАЇНСЬКО-АНГЛІЙСЬКИЙ СЛОВНИК НАЙБІЛЬШ ВЖИВАНИХ ТЕРМІНІВ

Графік навантажень	– load curve
Лічильник електричної енергії	– electricity meter
Розрахункове навантаження	– assumed load
Відхилення напруги	– voltage deviation
Несиметрія напруг	– voltage unbalance
Коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю	– voltages unbalance factor by reverse sequence
Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю	– voltages unbalance factor by zero sequence
Напруга зворотної послідовності	– reverse sequence voltage
Напруга нульової послідовності	– zero sequence voltage
Несинусоїдність	– nonsinusoidality
Вищі гармоніки	– higher harmonics
Коефіцієнт спотворення синусоїдності кривої напруги	– coefficient of distorsion of voltage curve harmonicity
Однофазне замикання на землю	– single-phase earth connection
Мережа з ізольованою нейтраллю	– isolated neutral point circuit
Мережа з компенсованою нейтраллю	– compensated neutral point circuit
Компенсувальна установка	– compensative plant
Регулятор реактивної потужності	– reactive power regulator
Плавкий запобіжник	– safety fuse
Автоматичний вимикач	– circuit breaker

Список використаних джерел

1. Электрические нагрузки промышленных предприятий / Г. М. Каялов и др. – Л.: Энергия, 1971.
2. Федоров А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий – М.: Энергия, 1982.
3. Электрические нагрузки промышленных предприятий / С. Д. Волобринский и др. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
4. Милях А. Н., Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Схемы симметрирования однофазных нагрузок в трехфазных цепях. – Киев: Наукова думка, 1973. – 219 с.
5. Шидловский А. К., Кузнецов В. Г. Повышение качества энергии в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1985. – 268 с.
6. Кузнецов В. Г. Григорьев А. С., Данилюк В. Б. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях. – К.: Наукова думка, 1992. – 240 с.
7. Железко Ю. С. Влияние потребителей на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение // Промышленная энергетика. – 1991. – №8. – С. 39 – 41.
8. Жежеленко И. В. Влияние отклонения и несимметрии напряжений питающей сети на работу асинхронных электродвигателей // Энергетика. – 1990. – №5. – С. 32–38.
9. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Введен в Украине с 01. 01. 2000 г.
10. Инструктивные материалы Главгосэнергонадзора. / Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 352 с.
11. Правила устройств электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 646 с.
12. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения пормпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331с.
13. Пивняк Г. Г., Шкрабец Ф. П. Несимметричные повреждения в электрических сетях карьеров. Справочное пособие. – М.: Недра, 1993. – 192 с.

Навчальне видання

Михайло Йосипович Бурбело, В'ячеслав Вікторович Камінський,
Іван Михайлович Романюк

ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Лабораторний практикум

Оригінал-макет підготував М. Й. Бурбело

Редактор В. О. Дружиніна
Коректор Ю. І. Франко

Науково-методичний відділ ВНТУ
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку
Формат 29,7 x 42 $\frac{1}{4}$
Друк різнографічний
Наклад прим.
Зам. №

Гарнітура Times New Roman
Папір офсетний
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі
Вінницького національного технічного університету
Свідоцтво Держкомінформу України
серія ДК № 746 від 25.12.2001
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ