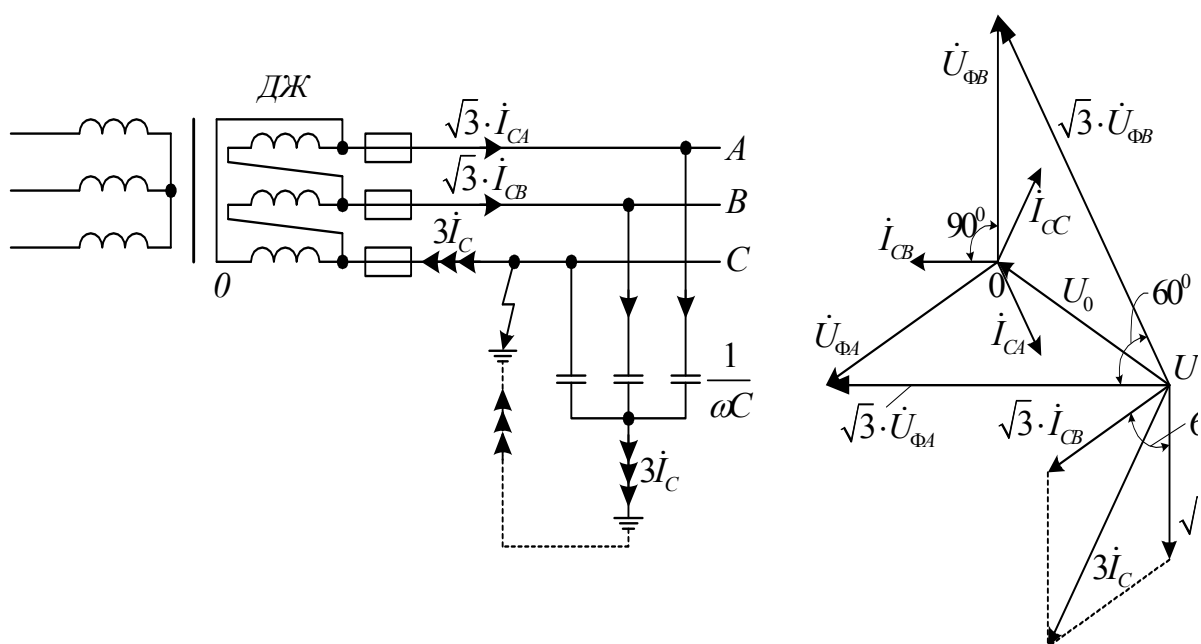


М. О. Головатюк, Ж. І. Остапчук, Н. В. Собчук

РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. О. Головатюк, Ж. І. Остапчук, Н. В. Собчук

РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

Лабораторний практикум

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.315
ББК 31.27
Г61

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 13 від 03.07.2008 р.)

Рецензенти:

В. В. Назаров, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

О. Д. Демов, кандидат технічних наук, доцент

Головатюк, М. О.
Г61 **Розподільні електричні мережі** : лабораторний практикум /
М. О. Головатюк, Ж. І. Остапчук, Н. В. Собчук. – Вінниця : ВНТУ,
2010. – 57 с.

В лабораторному практикумі розглянуто методи та засоби компенсації струмів однофазного замикання на землю, методи аналізу режимів роботи розподільних мереж. Лабораторний практикум розроблено відповідно до плану кафедри ЕСС та програми до дисципліни “Розподільні електричні мережі”.

УДК 621.315
ББК 31.27

© М. Головатюк, Ж. Остапчук, Н. Собчук, 2010

Зміст

Вступ	4
Опис стендів	5
1. Лабораторна робота № 1. Оптимізація робочих режимів електричної мережі	9
2. Лабораторна робота № 2. Оптимізація режиму роботи підстанції	13
3. Лабораторна робота № 3. Оцінка показників якості електри- чної енергії в розподільній електричній мережі	16
4. Лабораторна робота № 4. Регулювання напруги в розпо- дільній електричній мережі	23
5. Лабораторна робота № 5. Режими роботи нейтралі електри- чних мереж	30
6. Лабораторна робота № 6. Способи вимірювання ємнісних струмів замикання на землю	36
7. Лабораторна робота № 7. Компенсація ємнісних струмів	41
8. Лабораторна робота № 8. Визначення кута діелектричних втрат	44
Словник найуживаніших термінів	55
Література	56

Вступ

В умовах експлуатації та проектування розподільних електричних мереж завжди було і є основною задачею підвищення надійності та безперебійності електропостачання споживачів та створення гнучкої системи постачання електричної енергії. Певною мірою це досягається на етапі проектування використанням різних засобів автоматики та автоматизації.

В практичній діяльності при експлуатації електричних мереж розподілу та споживання електричної енергії необхідним є знання таких питань, як:

- методи та засоби компенсації струмів однофазного замикання на землю;
- технічні засоби компенсації реактивної потужності;
- методи аналізу роботи мережі та засоби регулювання напруги;
- методи аналізу режимів роботи розподільних електричних мереж;
- вимоги до якості електроенергії згідно з державним стандартом та засоби їх забезпечення на шинах споживачів;
- режими роботи нейтралей мережі та засоби їх забезпечення.

В ході виконання лабораторних робіт студенти повинні закріпити набуті знання для подальшого їх використання при вивченні курсів “Експлуатація електричних систем і мереж”, “Автоматизації розподільних електричних мереж” та творчо використовувати їх в практичній діяльності.

Для виконання лабораторних робіт студенти повинні вміти підготувати вхідну інформацію для аналізу режимів роботи розподільних електричних мереж на фізичній моделі, вибрати технічні засоби для забезпечення якості електричної енергії на шинах споживачів, проаналізувати режими роботи електричної мережі.

Виконуючи лабораторні роботи слід строго дотримуватись правил техніки безпеки.

Опис стендів

На стенді №1 виконано модель складнозамкненої розподільної електричної мережі. Стенд №1 розроблено в однофазному виконанні на клас напруги 36 В, з частотою 200 Гц, що відповідає реальній номінальній напрузі 35 кВ. Клас напруги вибрано з умови безпечного виконання лабораторних робіт, частота 200 Гц - для зменшення геометричних розмірів індуктивних, ємнісних елементів ліній та навантажень. Даний стенд є універсальним: він може використовуватися для аналізу режимів роботи радіальних, магістральних, складнозамкнених мереж за рахунок комбінації положень вимикачів РП1 - РП4 та приєднання або заміни ліній А, В, С з регульованими параметрами 2д, 2в, 2с. До шин РП1 - РП4 приєднані батареї статичних конденсаторів (БСК) з метою оптимізації режиму роботи розподільної електричної мережі.

Фізичну модель головної понижувальної підстанції (ГПП) стенду №1 виконано окремо на стенді №2.

На стенді №2 моделюється ГПП 110/10 кВ розподільної електричної мережі. Силові трансформатори Т1, Т2 змодельовані трансформаторами ТС - 1,5 з первинною напругою 380 В та вторинною напругою 100 В. Даний клас напруги взято з метою оцінки показників якості електричної енергії, приєднання трифазних засобів контролю, сигналізацій та інших, які серійно випускаються на напругу 380-100 В. В реальних умовах напруга 100 В використовується з вимірювальних трансформаторів напруги.

Один із силових трансформаторів виконаний з відгалуженнями $\pm 9,78\%$ відповідно до реальної моделі силового трансформатора з РПН класу 110/10 кВ. Це необхідно для оцінки якості зустрічного регулювання напруги в розподільній електричній мережі. При паралельній роботі трансформаторів Т1, Т2 можна оцінити перетоки потужності між трансформаторами при різних коефіцієнтах трансформації.

На шинах НН та ВН встановлені батареї статичних конденсаторів (БСК) для оцінки режимів роботи трансформаторів з позиції оптимізації реактивної потужності. Крім того, встановлено характерні види споживачів (лінійні, Н1 та нелінійні, Н2). На стенді також виконано модель кабельної лінії. Відповідно до потужності трансформаторів Т1, Т2 струми навантажень можуть досягати 5 А.

На стенді №3 моделюється електрична мережа для оцінки функціонування та оптимізації режимів роботи нейтралей. Стенд живиться трифазною напругою 380 В. Схема, в основному, складається із ємностей та індуктивностей, що відтворюють параметри повітряних та кабельних ліній, а також вимірювальних трансформаторів НТМИ-10. Місце приєднання заземлювального дугогасильного реактора (ЗДР) та резистора К - індуктивність трансформатора X_T . Змінюючи положення вимикачів QS1- QS13 змінюємо параметри мережі (X_L та С).

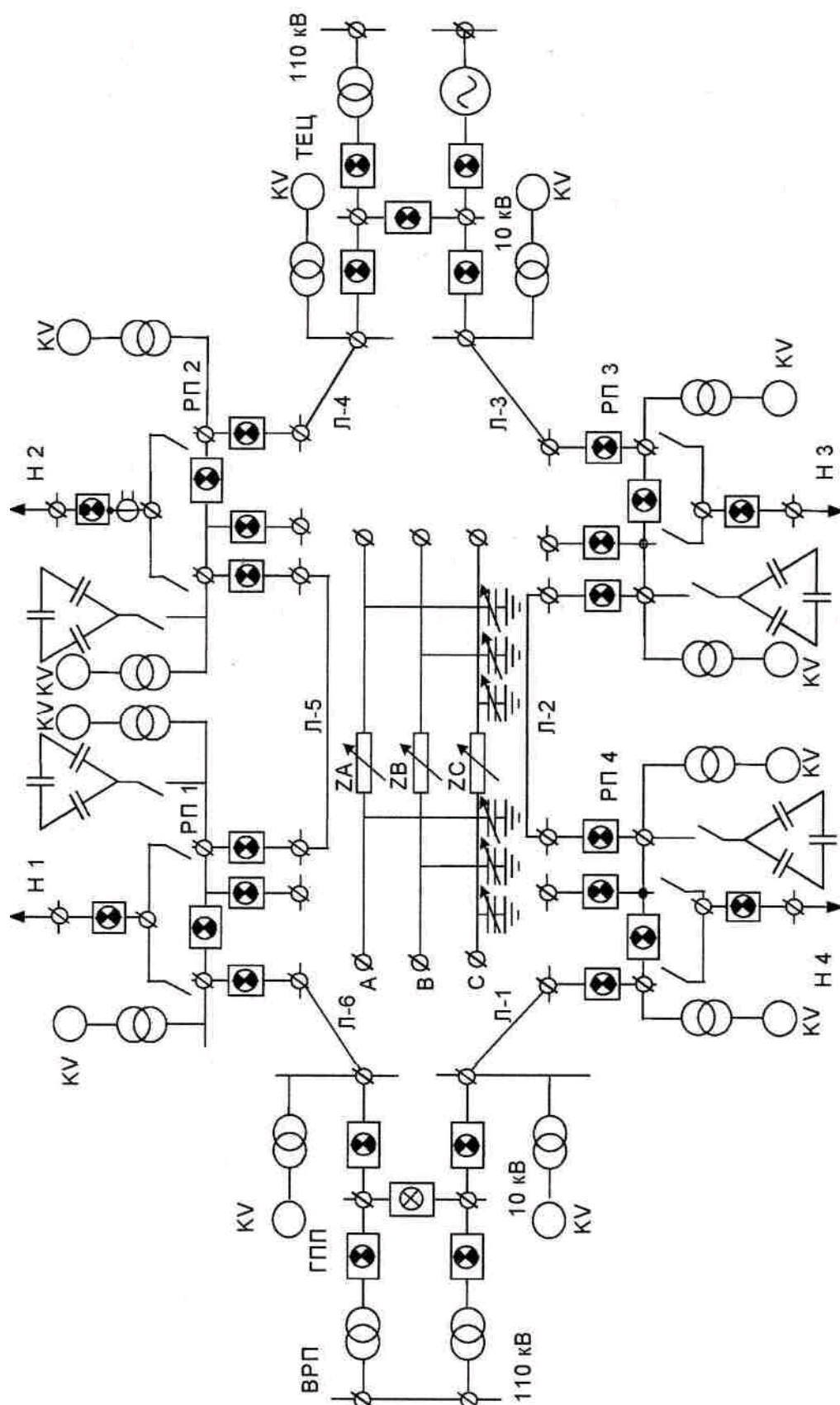


Рисунок 1 – Стенд № 1 для аналізу режимів роботи розподільної електричної мережі

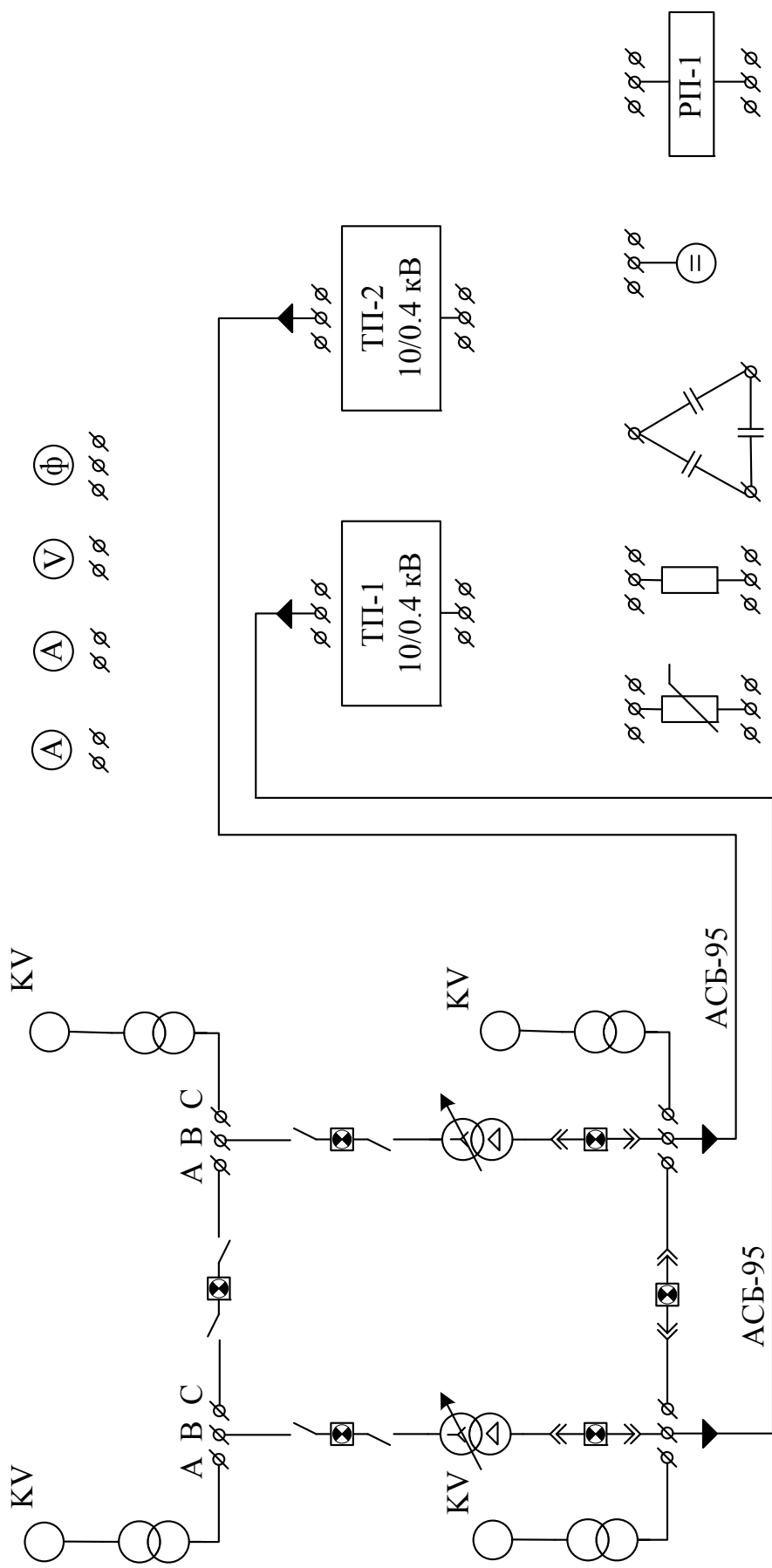


Рисунок 2 – Стенд лабораторних робіт № 2

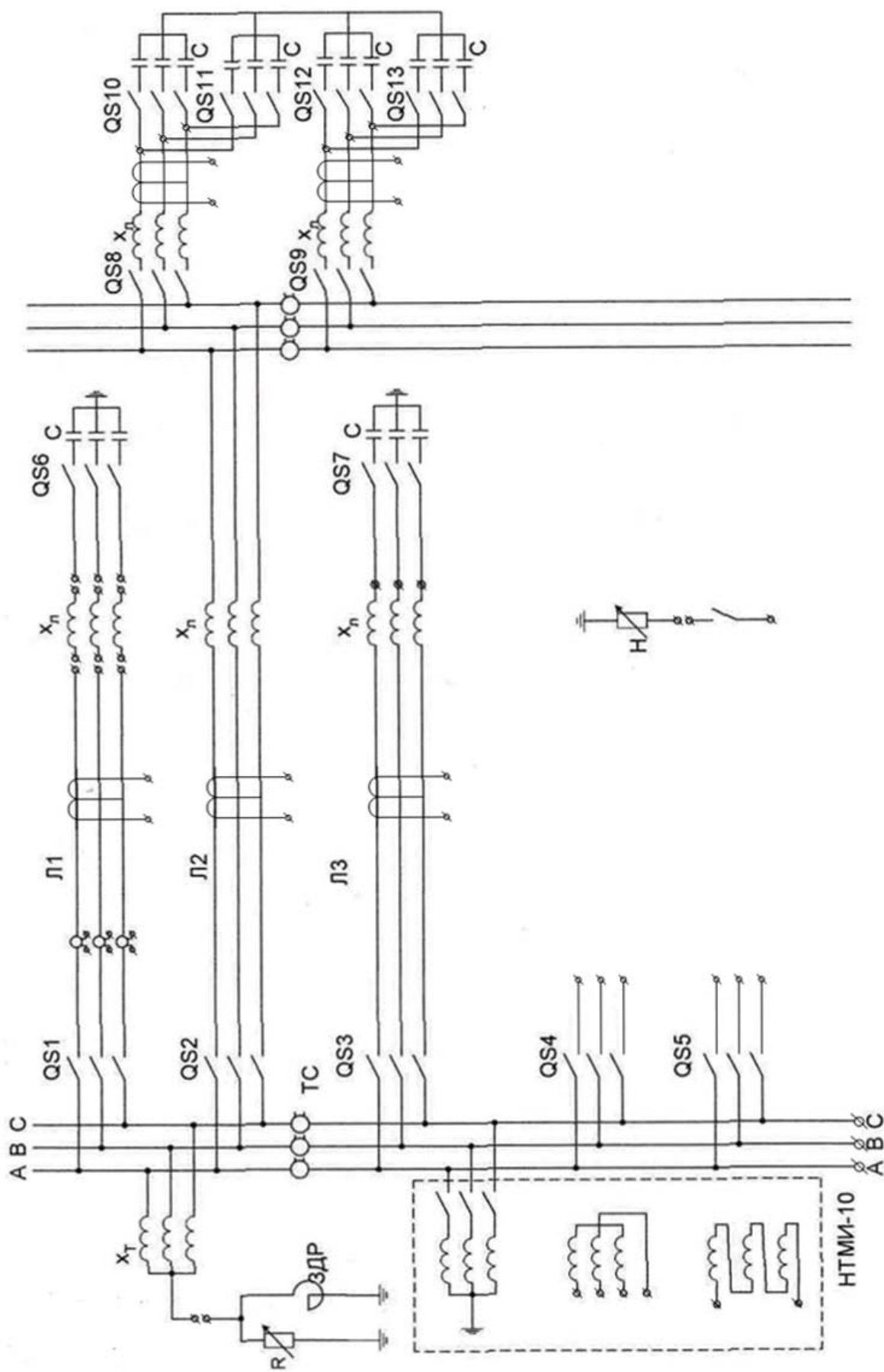


Рисунок 3 – Стенд лабораторних робіт № 3

Лабораторна робота №1

Оптимізація робочих режимів електричної мережі

Мета: Проаналізувати зміну параметрів режимів замкненої мережі при зміні характеру навантаження та параметрів ліній електропередач.

Теоретичні відомості

Розрахунок робочих режимів електричної мережі дає можливість оцінити умови, у яких будуть працювати електроспоживачі та устаткування мережі. Аналіз таких режимів вказує на необхідність передбачення заходів щодо забезпечення необхідної якості напруги, у першу чергу, напруг на затискачах електроспоживачів із припустимими відповідно до ДСТУ 13109 - 67 відхиленнями. Крім того, такого роду розрахунки дозволяють знайти оптимальні умови передавання необхідної кількості електроенергії, тобто дають можливість передбачити заходи щодо зниження втрат потужності та енергії в електричних мережах.

Основною задачею оптимізації робочих режимів електричних мереж є, по-перше, створення сприятливих умов живлення місцевих мереж за рахунок регулювання напруги в районних мережах; по-друге, забезпечення допустимих відхилень напруг на затискачах електроспоживачів, що живляться від місцевих мереж, за рахунок регулювання напруги в цих мережах. Регульовальні пристрої можуть застосовуватися для розв'язання двох задач:

- а) оптимізації режимів напруг;
- б) зниження втрат активної потужності.

Зниження втрат і регулювання напруги в елементах електричних мереж промислових підприємств досягається шляхом зменшення реактивної потужності, переданої по мережі, за рахунок установа додаткових регульованих джерел реактивної потужності, як такі у розподільних мережах найчастіше застосовуються конденсаторні батареї, що включаються паралельно до навантаження.

При включенні конденсаторів потужністю Q_d реактивне навантаження мережі зменшується ($Q_2 = Q_1 - Q_k$) і, якщо при цьому її активне навантаження незмінне, підвищення напруги буде визначатись за формулою:

$$\delta U_* = Q_k X / U_{ном}^2, \quad (1)$$

де X - реактивний опір мережі, Ом;
 $U_{ном}$ - лінійна номінальна напруга, В.

$$\delta U_* = \frac{Q_k X}{10 U_{ном}^2}, \quad (2)$$

де $U_{ном}$ виражена в кіловольтах, а Q_k - у кіловольтамперах реактивних.

Питома потужність конденсаторів (кВАр) при підвищенні напруги на 1 % визначається за формулою

$$\delta Q_k = Q_k / \delta U = 10 U_{ном}^2 / X. \quad (3)$$

Включення конденсаторних батарей послідовно з навантаженням приведе до зміни індуктивного опору мережі і є ефективним засобом для зниження різких коливань напруги, викликаних підключенням електродвигунів, роботою зварювальних апаратів і дугових печей, особливо при низьких значеннях коефіцієнта потужності навантаження.

Ступінь компенсації (%) характеризується виразом

$$k = \frac{X_k}{X} \cdot 100, \quad (4)$$

де X_k - ємнісний опір конденсаторів, Ом;

X – опір лінії, Ом.

Задаючи значення δU_* можна визначити необхідний ємнісний опір конденсаторної батареї X_k , скориставшись формулою

$$X_k = \delta U_* U_{ном}^2 \cdot 10 / Q_k. \quad (5)$$

Потужність конденсаторної батареї визначається з формули

$$Q_k = 3 I^2 X_k, \quad (6)$$

де I – робочий струм у лінії при максимальному навантаженні.

Напруга на послідовно включених конденсаторах $U_k = I X_k$ звичайно не перевищує 10 % фазної напруги мережі. Це дає можливість використовувати конденсатори, розраховані на значно нижчу напругу, ніж номінальна напруга мережі.

Визначивши X_k за формулою (5), необхідно знайти ємність (мкФ) конденсаторної батареї

$$C = \frac{10^6}{\omega X_k}. \quad (7)$$

Струм у лінії I порівнюється з паспортним значенням струму конденсаторів $I_{насп}$; при цьому необхідно, щоб виконувалась умова

$$I \leq I_{насп} . \quad (8)$$

Якщо ж струм споживача більший допустимого, то схему варто укомплектувати з декількох рівнобіжних віток.

Крім того, необхідно, щоб напруга на конденсаторній батареї U_k , не перевищувала номінальної напруги обраних конденсаторів. В іншому випадку конденсатори з'єднують послідовно.

Якщо напруги на затискачах споживача відомі до і після включення конденсаторів, а також якщо відоме навантаження споживача $P + jQ$, то потужність (кВАр) конденсаторної установки (батареї конденсаторів, включених у трьох фазах лінії) визначається за формулою:

$$Q_k = \frac{P}{\cos \varphi} \left[\sin \varphi - \sqrt{(U^2 / U_2') - \cos^2 \varphi} \right] , \quad (9)$$

де U_2 і U_2' – лінійні напруги до і після включення конденсаторів, кВ.

За отриманим значенням реактивної потужності розраховується потужність конденсаторної батареї на одну фазу:

$$Q_k = Q_{k.ф} / 3, \quad (10)$$

а потім знаходиться ємнісний опір батареї конденсаторів:

$$X_k = Q_{k.ф} / I^2 . \quad (11)$$

Після цього визначається ємність конденсаторної батареї і перевіряється, чи правильно обрані конденсатори.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти значення струмів, потужностей в лініях, навантаження та рівні напруг у вузлах при фіксованому значенні параметрів електричної мережі (згідно з стендом № 1 (див. рис. 1)).

2. Підключити компенсуючі пристрої у вузлах споживання та провести вимірювання величин, вказаних в п.1.

3. Змінити параметри ліній електропередач та провести вимірювання величин, вказаних в п.1.

4. Порівняти результати та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Основні задачі оптимізації робочих режимів електричних мереж.
2. Від чого залежить положення місця поточкорозподілу ?
3. Вплив параметрів схеми мережі на поточкорозподіл.
4. Вплив характеру навантажень на поточкорозподіл.
5. Що є джерелом реактивної потужності в електричній мережі ?
6. Яким чином досягається зниження втрат в елементах електричних мереж промислових підприємств ?
7. Які є компенсувальні пристрої ? Особливості їх застосування.

Лабораторна робота №2

Оптимізація режиму роботи підстанції

Мета: Проаналізувати режими роботи двотрансформаторної підстанції напругою 110/10 кВ при зміні коефіцієнта трансформації та характеру навантаження.

Теоретичні відомості

Напруги в електричних мережах безупинно змінюються через зміну їхніх навантажень і напруг у центрі живлення. Підтримка допустимих відхилень напруги досягається тільки шляхом її регулювання. Централізоване регулювання напруги забезпечує певний діапазон відхилень напруг у точках приєднання місцевих мереж (у центрі живлення). При регулюванні напруги в центрі живлення напруги в місцевій мережі, що живиться від цього центра, не залежать від втрат напруги в мережі, що живить центр. Задачею оптимізації напруг у місцевій мережі є створення таких рівнів напруги, при яких відхилення напруги на затискачах електроспоживачів не виходили б за допустимі межі.

Одним із заходів щодо забезпечення допустимих відхилень напруги на затискачах електроспоживачів є правильний вибір коефіцієнтів трансформації трансформаторів із ПБЗ (переключенням без збудження). Щоб домогтися допустимих відхилень напруги на затискачах електроспоживачів, необхідно мати певні значення напруги на шинах трансформаторів.

Відхилення напруги на стороні НН трансформатора при максимальному навантаженні (V_2') і при мінімальному навантаженні (V_2'') можуть бути знайдені за формулами:

$$\left. \begin{aligned} V_2' &= V_1' + E - \Delta U_{mp}' \\ V_2'' &= V_1'' + E - \Delta U_{mp}'' \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де V_1' і V_1'' - відхилення напруги на стороні ВН трансформатора при максимальному і мінімальному навантаженнях відповідно;

E - додаток до напруги (у відсотках номінального), створювана трансформатором залежно від його коефіцієнта трансформації;

$\Delta U_{mp}'$ і $\Delta U_{mp}''$ - втрати напруги (у відсотках номінального) в обмотках трансформатора при максимальному і мінімальному навантаженнях.

Трансформатори, що випускаються в даний час, із ПБЗ виконуються крім основного (третього) відгалуження ще з чотирма додатковими відгалуженнями на обмотці ВН (таблиця 1).

Таблиця 1 – Напруги відгалужень обмотки трансформатора з ПБЗ і значення додатку напруги

Номер відгалуження	Напруга відгалужень обмотки ВН трансформатора			Додаток до напруги трансформатора $E, \%$
	$U_{від}, \text{кВ}$		$V_{від}, \%$	
1	6,30	10,50	+5,0	0
2	6,15	10,25	+2,5	2,5
3	6,00	10,00	0	5,0
4	5,85	9,75	-2,5	7,5
5	5,70	9,50	-5,0	10,0

У трансформаторах із ПБВ коефіцієнт трансформації можна змінювати тільки при відключенні трансформатора від мережі, і його змінюють кілька разів на рік залежно від сезонного навантаження.

Обраний коефіцієнт трансформації повинен бути таким, щоб при максимальному і мінімальному навантаженнях відхилення напруги на затискачах споживачів не виходили за допустимі межі. Оскільки при обраному коефіцієнті трансформації збільшення напруги E при максимальному і мінімальному навантаженнях буде таким самим, його можна знайти зі співвідношень (12).

Найприйнятнішими змінами відхилень напруги на стороні НН трансформатора є значення V_2 , коли

$$0 \leq V_2 \leq 5\% \quad (13)$$

як при максимальному, так і при мінімальному навантаженнях. Права частина цієї нерівності ($V_2 \leq 5\%$) відповідає випадку, коли до шин трансформатора на невеликій відстані від них підключається освітлювальне навантаження, для якого допустиме відхилення напруги на затискачах $V_{дон}^+$ дорівнює 5%. Якщо ж від шин розподільного трансформатора одержують живлення тільки електричні двигуни, для яких допустиме позитивне відхилення напруги $V_{дон}^+$ дорівнює 10 %, діапазон відхилень напруги може бути розширений:

$$0 \leq V_2 \leq 10\% . \quad (14)$$

Ліва частина нерівності (14) обумовлена необхідністю мати достатні втрати напруги в лініях, що живляться від розподільного трансформатора, щоб

$$\Delta U_{дон} = V_2' - V_{дон}^- , \quad (15)$$

де $V_{\text{доп}}^-$ - допустиме негативне відхилення напруги (-2,5 % для освітлювального навантаження і -5% для всіх інших електроспоживачів).

У випадку, якщо не можна підібрати відгалуження так, щоб нерівності при максимальному і мінімальному навантаженнях виконувалися, необхідно розширити діапазон допустимих відхилень напруг, наприклад шляхом установлення стабілізатора напруги в освітлювальній лінії, якщо джерела світла є електроспоживачами, за якими вибираються допустимі відхилення напруги ($0 \leq V_2 \leq 5\%$).

При установці стабілізатора в освітлювальній лінії відхилення напруги V_2 визначається допустимими відхиленнями напруги інших електроспоживачів.

Домогтися необхідних відхилень напруг V_2 при максимальному і мінімальному навантаженнях можна також за рахунок зменшення втрат напруги в елементах електричної мережі (в обмотках розподільного трансформатора, в живильній лінії).

Порядок виконання роботи

1. Виміряти значення струмів, напруг, потужності на шинах підстанції (згідно зі стендом № 2 (див. рис. 2), при паралельній та окремій роботі трансформаторів з фіксованим навантаженням.
2. Змінити характер навантаження та виконати вимірювання величин відповідно до п.1.
3. Змінити коефіцієнт трансформації одного трансформатора при незмінному значенні іншого та провести вимірювання величин відповідно до п.1.
4. Порівняти результати та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Параметри, за якими виконують оптимізацію режиму роботи підстанції.
2. Умови паралельної роботи трансформаторів.
3. Як змінюються зрівняльні струми при зміні коефіцієнта трансформації ?
4. Як змінюються втрати потужності залежно від характеру навантаження ?
5. В чому заключається різниця між пристроєм РПН та ПБЗ ?
6. Як впливає зміна коефіцієнта трансформації на режими роботи підстанції ?
7. Як впливає зміна характеру навантажень на режими роботи підстанцій ?

Лабораторна робота №3
Оцінка показників якості електричної енергії в розподільній
електричній мережі

Мета: Проаналізувати вплив характерних споживачів на показники якості електричної енергії .

Теоретичні відомості

Показники якості електроенергії наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 - Показники якості електроенергії

Джерело живлення	Нормовані параметри якості електричної енергії, визначені на шинах приймачів
Електричні мережі однофазного струму	Відхилення частоти Розмах коливань частоти Відхилення напруги Розмах зміни напруги Коефіцієнт спотворення кривої напруги
Електричні мережі трифазного струму	Відхилення частоти Розмах коливань частоти Відхилення напруги Розмах зміни напруги Коефіцієнт несинусоїдальності напруги Коефіцієнт зворотної послідовності напруг Коефіцієнт нульової послідовності напруг
Електричні мережі постійного струму	Відхилення напруги Розмах зміни напруги Коефіцієнт пульсації напруги

1. Відхилення частоти, Гц або % — це різниця між дійсним і номінальним значеннями основної частоти

$$\Delta f = f - f_{ном} \quad (16)$$

або

$$\Delta f = \frac{f - f_{ном}}{f_{ном}} \cdot 100 \quad (17)$$

2. Розмах коливань частоти, Гц або % — це різниця між найбільшим і найменшим значеннями основної частоти за певний проміжок часу

$$\delta f = f_{\max} - f_{\min} \quad (18)$$

або

$$\delta f = \frac{f_{\max} - f_{\min}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (19)$$

Під коливанням частоти розуміють ті зміни, які відбуваються зі швидкістю 0,2 Гц

3. Оцінка всіх показників якості електроенергії, що відносяться до напруги, проводиться за діючими значеннями напруги.

4. Відхилення напруги, кВ або %, - це різниця між дійсним і номінальним значеннями напруги

$$\nu = U - U_{\text{ном}} \quad (20)$$

або

$$\nu = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \quad (21)$$

В електричних мережах трифазного струму дійсна напруга визначається як напруга прямої послідовності основної частоти.

Коливання напруги оцінюються:

а) розмахом зміни напруги, кВ або %, різниця між екстремумами, що йдуть один за одним, обвідної дійсних значень напруги; якщо обвідна дійсних значень напруги має горизонтальні ділянки, то розмах зміни напруги визначається як різниця між сусідніми екстремумом і горизонтальною ділянкою чи як різниця між сусідніми горизонтальними ділянками (рис. 4).

$$\nu = U - U_{\text{ном}} \quad (22)$$

або

$$\nu = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 ; \quad (23)$$

б) частотою зміни напруги, 1/с, 1/хв, 1/год

$$F = \frac{m}{T}, \quad (24)$$

де m - кількість змін напруги зі швидкістю змінення більше 1% в секунду за час T ;

в) інтервалом між змінами напруги, що ідуть одна за одною, Δt_k (рис. 5).

5. Коефіцієнт зворотної послідовності напруг ε_2 , %, - це відношення напруги зворотної послідовності основної частоти, визначається розкладанням на симетричні складові системи лінійних напруг, до номінальної лінійної напруги:

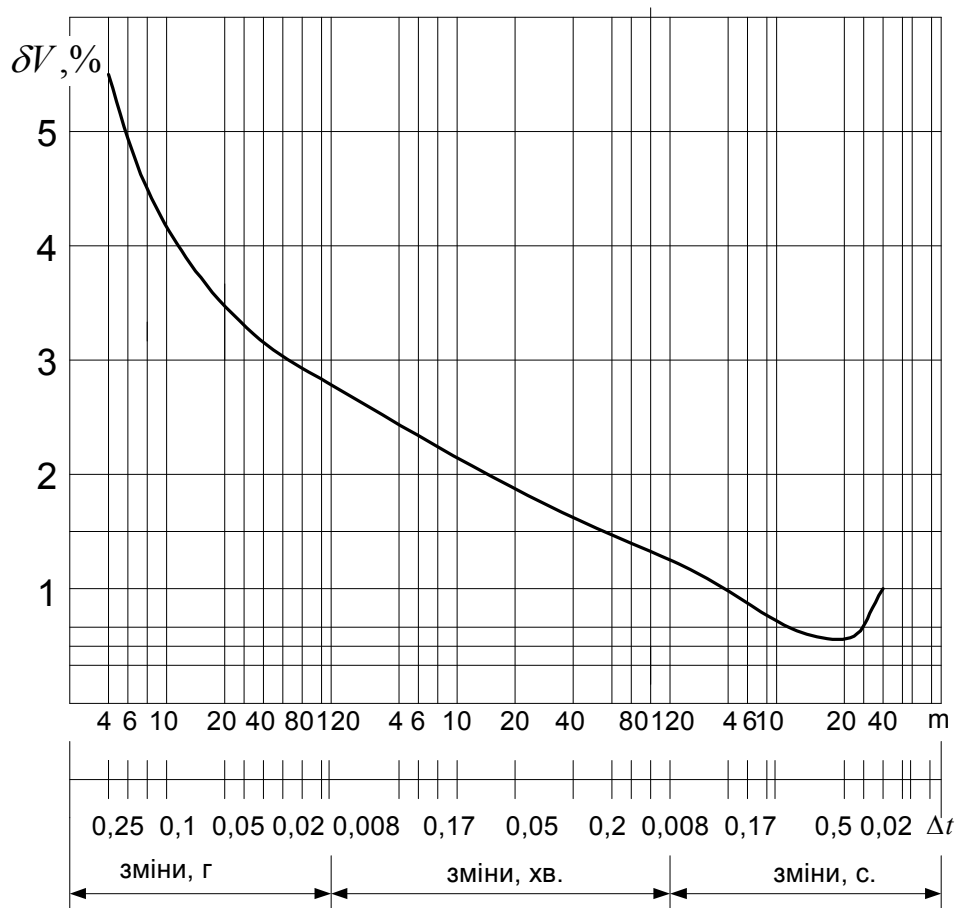


Рисунок 4 - Допустимі значення розмахів змін напруги залежно від частоти їх повторення

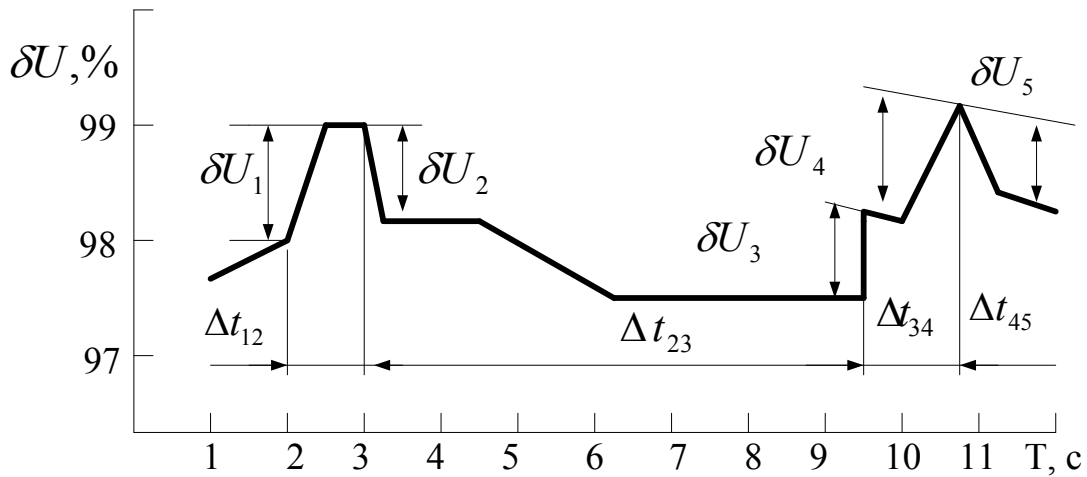


Рисунок 5 - Коливання напруги (п'ять розмахів зміни напруги за 12 с)

6. Коефіцієнт нульової послідовності напруг ε_0 , %, – це відношення

$$\varepsilon_2 = \frac{U_2}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (25)$$

напруги нульової послідовності основної частоти до номінальної фазної напруги:

$$\varepsilon_0 = \frac{U_0}{U_{ном}} \cdot 100. \quad (26)$$

7. Коефіцієнт викривлення кривої напруги $K_{вик}$, %, – це відношення діючого значення гармонічної складової несинусоїдальної напруги до напруги основної частоти :

$$K_{вик} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{\infty} U_v^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^V U_v^2}}{U_{ном}} \cdot 100, \quad (27)$$

де U_v – діюче значення напруги v -тої гармоніки, В, кВ;

n – номер останньої з гармонік, що враховуються.

8. Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги – це відношення діючого значення змінної складової пульсуючої напруги до її номінального значення:

$$K_n = \sqrt{\sum_{v=1}^n U_v^2 / U_{ном}}. \quad (28)$$

Норми якості електричної енергії біля її приймачів в нормальних та післяаварійних експлуатаційних режимах роботи енергетичних систем та стаціонарних електричних мереж постійного струму частотою 50 Гц та постійного струму наводяться в таблиці 3.

Таблиця 3 – Допустимі значення показників якості електричної енергії

Показники якості	Приймачі електричного струму	Норми	Пояснення
1	2	3	4
Відхилення частоти: нормальний режим тимчасова робота	—	$\pm 0,1$ Гц $\pm 0,2$ Гц	1. Усереднене за 10 хв 2. Вказані норми не поширюються на період після-аварійного встановлення частоти
Розмах коливань частоти	—	Не більше 0,2 Гц	
Відхилення напруги	Затискачі приладів робочого освітлення, встановленого у виробничих приміщеннях і суспільних спорудах, де потрібне значне зорове навантаження; прожектори зовнішнього освітлення	$(-2,5 \div +5,0)$ % $U_{\text{ном}}$	В післяаварійних режимах допускається додаткове зниження напруги на 5,0 %
	Затискачі електричних двигунів і апаратів для їхнього пуску і керування	$(-5,0 \div +10)$ % $U_{\text{ном}}$	
	Затискачі інших приймачів, в тому числі тваринницьких комплексів і птахофабрик	$\pm 5,0$ % $U_{\text{ном}}$	
	В електричних мережах сільськогосподарських районів, окрім тваринницьких комплексів і птахофабрик, і в мережах, що живляться від шин тягових підстанцій електрифікованого транспорту	Допускаються інші відхилення напруги	При наявності спеціальних техніко-економічних обґрунтувань, з дозволу Міністерства енергетики України

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
Розмах зміни напруги	Затискачі ламп розжарювання	Визначається по кривій на рисунку 5	Залежно від частоти їх повторів чи інтервалу між змінами напруги, що йдуть одна за одною
	В електричних мережах, що живляться від шин тягових підстанцій електрифікованого транспорту	Допускають ся інші значення коливання напруги	При наявності спеціальних техніко-економічних обґрунтувань, з дозволу Міністерства енергетики України
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги	Затискачі будь-якого трифазного симетричного приймача електричної енергії	До 2,0 % тривалий час	Не поширюється на приймачі, приєднані до електричних мереж, що живляться від шин тягових підстанцій залізних доріг, електрифікованих на змінному струмі, за виключенням випадків живлення приймачів, що мають певні вимоги до несиметрії напруги
Коефіцієнт нульової послідовності напруги	В трифазній розподільній мережі з однофазними освітлювальними і побутовими приймачами електричної енергії	Не повинно перевищувати значень, при яких значення напруги виходить за допустимі межі	З урахуванням відхилення напруги прямої послідовності, напруги зворотної послідовності і гармонік напруг

Продовження таблиці 3

1	2	3	4
Коефіцієнт викривлення кривої напруги	Затискачі будь-якого приймача електричної енергії	До 5,0 % тривалий час	—
Коефіцієнт пульсації випрямленої напруги	Затискачі електричних двигунів постійного струму	Не більше 8,0 %	—

Порядок виконання роботи

1. Виміряти значення частоти, напруги, несиметрії напруг, рівні вищих гармонік при фіксованому значенні навантаження (відповідно до стенду № 2 (див. рис. 2)).
2. Змінити характер навантаження за модулем, фазою та ступенем нелінійності та провести вимірювання величин за п.1.
3. Провести аналітичний розрахунок показників якості електроенергії.
4. Порівняти виміряні та розраховані значення і зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Як впливає баланс активних потужностей на зміну частоти ?
2. Як впливає баланс реактивних потужностей на зміну напруги?
3. Як впливає несиметрія мережі на роботу споживачів?
4. Як впливає наявність вищих гармонік на роботу споживачів?
5. Що таке “лавина частоти”?
6. Що таке “лавина напруги”?
7. Які показники впливають на якість електроенергії ?

Лабораторна робота №4

Регулювання напруги в розподільній електричній мережі

Мета: Освоїти принципи централізованого та місцевого регулювання напруги в електричній мережі.

Теоретичні відомості

При проектуванні та експлуатації електричних мереж необхідно передбачити заходи, що забезпечують високу якість переданої електроенергії, одним з основних показників якої є відхилення напруги на затискачах електроспоживача. Оскільки зміни навантаження протягом часу і режиму напруги в центрі живлення призводять до зміни втрат напруги в елементах електричних мереж і до відхилення напруги на затискачах всіх електроспоживачів мережі, у мережах усіх ступенів потрібно регулювання напруги. Тому при проектуванні електричних мереж завжди виникає необхідність у виборі регулювальних пристроїв, місць установлення, діапазону і ступеня регулювання. При цьому розглядаються питання як виконання технічних вимог відповідно до діючих норм, так і підвищення економічності режимів.

При проектуванні електричних мереж передбачається установлення регулювальних пристроїв як у живильних, так і в розподільних мережах, причому, регулювання напруги в живильних мережах виконується незалежно від його регулювання в розподільних мережах. Якщо основною задачею регулювальних пристроїв розподільних мереж є забезпечення відхилень, що допускаються нормами, напруги на затискачах електроспоживачів, то задача регулювальних пристроїв живильних мереж зводиться до поліпшення техніко-економічних показників роботи цих мереж, насамперед, шляхом зниження втрат потужності й енергії за рахунок зміни мережі, підвищення економічності роботи неоднорідної замкнутої мережі і т.д.

Завдяки розробленим типовим рішенням, які застосовувались у більшості практичних випадків, задача вибору регулювальних пристроїв при проектуванні мереж трохи спрощується. Певні труднощі виникають у зв'язку з необхідністю узгодження законів регулювання окремих пристроїв. Однак, у більшій мірі, це відноситься до умов наступної експлуатації мережі.

Основними типовими рішеннями, реалізованими при проектуванні будь-яких електричних мереж, є:

1. Застосування трансформаторів із РПН на прийомних підстанціях, від яких живляться розподільні мережі. При проектуванні реконструкції мережі на існуючих підстанціях, де встановлені трансформатори без РПН, необхідне установлення лінійних регуляторів, що включаються в колі трансформаторів.

2. Застосування додаткових лінійних регуляторів, що включаються в окремі лінії, при наявності неоднорідних навантажень, що різко змінюються в часі; розподіл ліній на групи з приблизно однаковими графіками навантажень для здійснення диференційованого (по групах) централізованого регулювання за допомогою лінійних регуляторів.

3. Використання регульованих джерел реактивної потужності (синхронних компенсаторів, конденсаторних батарей) на районних підстанціях для регулювання напруги.

4. Використання як додаткових регулювальних пристроїв у розподільних мережах керованих батареї конденсаторів.

5. Окреме регулювання напруги силових і освітлювальних електроспоживачів (які допускають різні відхилення від номінальної напруги) за допомогою групових засобів регулювання у випадках, коли централізоване і місцеве регулювання напруг не забезпечують допустимих відхилень напруги на затискачах електроспоживачів.

Розглянемо один із основних методів регулювання напруги - регулювання напруги безпосередньо на трансформаторах. Для регулювання напруги в мережі за допомогою трансформаторів на одній з обмоток передбачається крім основного виводу допоміжні виводи і відповідні перемикальні пристрої для зміни коефіцієнта трансформації. Розрізняють два види перемикальних пристроїв, а саме: пристрій для перемикання числа витків при відключеному трансформаторі, тобто без збудження – ПБЗ; пристрій для переключення числа витків під навантаженням – РПН. Пристроєм першого виду комплектуються всі трансформатори. Ці пристрої дозволяють забезпечити зміну коефіцієнта трансформації в межах $\pm 5\%$, пристрої другого виду розраховані на зміну коефіцієнта трансформації в значно більших межах – до 20% . Виводи для регулювання напруги виготовляють, як правило, на обмотках високої напруги, тому що там протікають малі робочі струми порівняно з обмоткою низької сторони.

На рисунку 6 показано графік регулювання напруги, який дає пояснення взаємозв'язку номінальних напруг мережі, джерел і приймачів електричної енергії. Як приклад, на рисунку 6 наведена мережа трьох ступенів напруги: 110, 10 і 0,38 кВ і подано графічне зображення діючих напруг по відрізках навантажень мережі.

Таким чином, вибір засобів регулювання починається з вибору трансформатора з РПН, встановлюваного в центрі живлення розподільних мереж. Сучасні трансформатори з РПН випускаються з такими діапазонами регулювання напруги: $\pm 9\%$ при ступені регулювання $1,5\%$ шістьма відгалуженнями в бік збільшення і зменшення коефіцієнта трансформації трансформатора, тобто $\pm 9 = \pm 6 \times 1,5\%$ і $\pm 12 = \pm 8 \times 1,5\%$ при ВН 35 кВ; $\pm 15\% = \pm 10 \times 1,5\%$ і $\pm 6 = \pm 9 \times 1,78\%$ при ВН 110 кВ; $\pm 12 = \pm 8 \times 1,5\%$ і $\pm 12 = \pm 9 \times 1,35\%$ при ВН 154 кВ; $\pm 12 = \pm 8 \times 1,5\%$ при ВН 220 кВ.

При виборі типу трансформатора з заданим діапазоном регулювання напруги необхідно враховувати не тільки напругу на стороні ВН трансформатора при максимальному і мінімальному навантаженнях ($(U'_1$ і $U''_1)$), але й необхідність здійснення зустрічного регулювання напруги на трансформаторі (на стороні НН трансформатора при мінімальному навантаженні $U''_{mp2} = U_{ном2}$, а при максимальному навантаженні $U'_{mp2} = 1,05 U_{ном2}$, де $U_{ном2}$ – номінальна напруга ліній, що живляться від шин трансформатора). Оскільки бажані напруги на стороні НН трансформатора відомі ($U'_{mp2} = 1,05 U_{ном2}$; $U''_{mp2} = U_{ном2}$), можна визначити номери відгалужень, на яких повинен працювати трансформатор:

– при максимальному навантаженні

$$n' = \frac{\left[(U'_1 - \Delta U'_{mp}) \frac{U_{тр.ном2}}{U_{тр.ном1} U'_{mp2}} - 1 \right] \times 100}{E_{ст}}; \quad (29)$$

– при мінімальному навантаженні

$$n'' = \frac{\left[(U''_1 - \Delta U''_{mp}) \frac{U_{тр.ном2}}{U_{тр.ном1} U''_{mp2}} - 1 \right] \times 100}{E_{ст}}, \quad (30)$$

де $\Delta U'_{mp}$ і $\Delta U''_{mp}$ - втрати напруги в трансформаторі при максимальному і мінімальному навантаженнях, відповідно;

$U_{трном2}$, $U_{трном1}$ - номінальні (каталожні) напруги на сторонах НН і ВН трансформатора, відповідно;

$E_{ст}$ - ступінь регулювання напруги трансформатора, %.

Отримані номери округляються до найближчих стандартних, а розрахункові значення напруг відгалужень порівнюються зі стандартними. Якщо $n > n_{ст}$, то це значить, що такий трансформатор не зможе забезпечити необхідні відхилення напруги і необхідний трансформатор із великим діапазоном відгалужень ($\pm n_{ст} \times E_{ст}$) або необхідно передбачити міри для зниження відхилень напруги на стороні ВН трансформатора або для зменшення втрат напруги в самому трансформаторі.

Визначивши, на яких відгалуженнях повинен працювати трансформатор, знаходять напруги, що будуть на стороні НН трансформатора при максимальному і мінімальному навантаженнях:

$$\left. \begin{aligned} U'_{mp2} &= (U'_1 - \Delta U'_{mp}) \frac{U_{mp, ном 2}}{U_{mp, ном 1} (1 + n'_{ct} E_{ct} / 100)}; \\ U'_{mp2} &= (U''_1 - \Delta U''_{mp}) \frac{U_{mp, ном 2}}{U_{mp, ном 1} (1 + n''_{ct} E_{ct} / 100)}. \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

Наступним етапом є вибір закону регулювання напруги на шинах центру живлення, визначення допустимих втрат напруги в розподільних мережах напругою вище 1000 В (СН) і в мережах напругою до 1000 В (НН), а також розміщення відгалужень на розподільних трансформаторах із ПБЗ. В основу розрахунку покладене забезпечення допустимих відхилень напруг на затискачах всіх електроспоживачів з однорідними графіками навантажень.

Розв'язання задачі починається з аналізу можливості забезпечення відхилень напруги на затискачах всіх електроспоживачів. При цьому користуються поняттям електричної віддаленості розподільного трансформатора від центру живлення, під якою розуміють сумарну втрату напруги в живильній лінії ΔU_{li} і в трансформаторі ΔU_{mpi}

$$\lambda_i = \Delta U_{li} + \Delta U_{mpi}. \quad (32)$$

Спочатку визначається максимально можлива віддаленість розподільного трансформатора від центру живлення

$$\lambda_m = E_{mp\max} + E_{cp} + \lambda_m, \quad (33)$$

де $E_{mp\max}$ - максимально допустиме відхилення напруги на затискачах електроспоживачів, що живляться від розподільного трансформатора (для вітчизняних трансформаторів $E_{mp\max} = 10\%$);

E_{cp} – ступінь регулювання, %;

λ_m – мінімальна віддаленість трансформатора, %.

Потім визначається віддаленість кожного розподільного трансформатора

$$\lambda_i = \Delta U_{li} + \Delta U_{mpi} \quad (34)$$

і перевіряється можливість забезпечення допустимих відхилень напруги на затискачах електроспоживачів (умова $\lambda_m \geq \lambda_i$).

Наступним кроком є визначення закону регулювання напруги в центрі живлення. З цією метою розраховуються :

$$\left. \begin{aligned} E'_u &= V_{\text{доп}}^+ + \lambda_m \\ E_{mpM} &= \lambda_M - \lambda_m \end{aligned} \right\}, \quad (35)$$

де $V_{\text{доп}}^+$ – максимально допустиме відхилення напруги на затискачах електроспоживачів, які живляться від розподільного трансформатора.

За значенням E_{mpM} , знайденим за формулою (35), вибирається найближче стандартне відгалуження трансформатора E_{mpcmM} , і визначається добавка напруги в центрі живлення при коефіцієнті завантаження трансформатора $\beta = 0$:

$$E_{u.x} = V_{\text{доп}}^+ - E_{mpcmM}. \quad (36)$$

Закон регулювання напруги в центрі живлення має вигляд:

$$V_u = \beta D + E_{u.x} = \beta \cdot (E_u - E_{u.x}), \quad (37)$$

де E'_u – додаток до напруги в центрі живлення при $\beta = 1$.

Графічна інтерпретація цього закону зображена на рисунку 7.

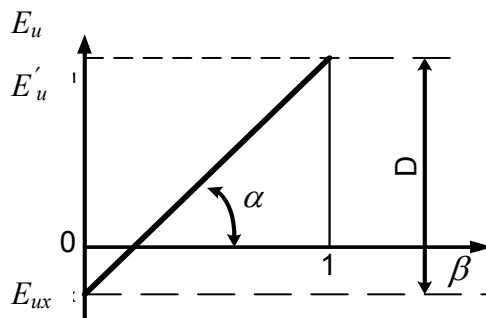


Рисунок 7 – Закон регулювання напруги

За формулою

$$E_{mpi} = \lambda_i - \lambda_m \quad (38)$$

визначаються необхідні додатки до напруги на всіх розподільних трансформаторах мережі і підбираються стандартні відгалуження.

У випадку, якщо електрична віддаленість якого-небудь розподільного трансформатора більше λ_M , необхідно передбачити місцеві засоби регулювання напруги, у першу чергу - автоматизовані джерела реактивної потужності.

В електричних мережах з метою зменшення втрат потужності й енергії штучно змінюють потоки реактивної потужності. Для цього поблизу споживачів встановлюють джерела реактивної потужності: синхронні компенсатори, конденсаторні батареї і синхронні двигуни.

Основною задачею компенсувальних пристроїв є найбільш економічне вироблення реактивної потужності; при цьому знижуються також втрати напруги, підвищуються рівні напруги в споживачів і поліпшується якість електроенергії.

У мережах промислових підприємств поширений спосіб регулювання напруги шляхом змінення потужності конденсаторних батарей, включених паралельно до навантаження. Потужність цих батарей і підвищення напруги, що досягаються, розраховуються за формулами (3), (6) і (1), (2).

У мережах промислових підприємств, що живлять силові електроспоживачі і джерела світла, висуваються жорсткіші вимоги до відхилень напруги (+5 і -2,5% порівняно з +10 і -5% для електродвигунів). При неможливості виконання цих вимог на затискачах всіх електроспоживачів доцільно джерела світла живити від групових регулювальних пристроїв, що випускаються промисловістю. У цьому випадку закон регулювання напруги в центрі живлення і відгалуження на розподільному трансформаторі вибираються, виходячи з допустимих відхилень напруги на затискачах силових електроспоживачів.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти величини напруги на шинах 110, 10, 0.4 кВ (відповідно до стенду № 2 (див. рис. 2) при фіксованому значенні навантаження.
2. При відхиленні напруг (виміряних за п.1) підібрати бажане положення відгалужень регуляторів трансформаторів з РПН та ПБЗ з метою забезпечення допустимих значень.
3. Змінити навантаження споживачів і провести вимірювання за пунктом 1.
4. Розрахувати аналітично значення відповідних напруг та порівняти з результатами дослідів і зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Що впливає на зміну напруги в електричній мережі?
2. Як змінюється величина втрат напруги в лінії від зміни коефіцієнта трансформації трансформаторів?
3. Організаційні заходи для забезпечення допустимих рівнів напруг.
4. Яким чином вибираються засоби регулювання напруги в мережі ?
5. Як впливає наявність вищих гармонік на роботу споживачів ?
6. Де встановлюють компенсувальні пристрої ?
7. В чому полягає метод регулювання напруги безпосередньо на трансформаторі ?
8. Основні методи регулювання напруги в розподільній електричній мережі.

Лабораторна робота №5
Режими роботи нейтралі електричних мереж

Мета: Виміряти струми і напруги при різних режимах роботи нейтралі мереж.

Теоретичні відомості

При роботі мережі з ізольованою нейтраллю та відсутності замикання на землю, на нейтралі мережі з'являється напруга несиметрії U_{HC} (В) обумовлена несиметрією ємностей фаз відносно землі, яка визначається за формулою

$$U_{HC} = \frac{U_A (C_A + a^2 C_B + a C_C)}{C_A + C_B + C_C}, \quad (39)$$

де U_A - вектор напруги фази А, В;
 C_A, C_B, C_C - ємності фаз відносно землі, мкФ;
 a - фазний множник, який визначається за виразами:

$$a = -\frac{I}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (40)$$

та

$$a^2 = -\frac{I}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (41)$$

Ступінь несиметрії напруг, %, визначається за формулою

$$U_{HC} = \frac{U_{HC}}{U_{\phi}} 100. \quad (42)$$

Ємнісний струм замикання на землю I_C (А) визначається за формулою

$$I_C = 3\omega C_{\phi} U_{\phi} 10^{-6}, \quad (43)$$

де ω - кутова частота напруги, s^{-1} ;
 C_{ϕ} - ємність фази мережі, мкФ;
 U_{ϕ} - фазна напруга, В.

Струм I_K (А) компенсації дугогасильного реактора визначається за формулою

$$I_K = \frac{U_\phi}{\omega L_P}, \quad (44)$$

де L_P - індуктивність реактора, Гн .

Ступінь розладення компенсації V (%) визначається за формулою

$$V = \frac{I_c - I_K}{I_c} 100, \quad (45)$$

В мережі з підключеним дугогасильним реактором на нейтралі з'являється напруга зміщення нейтралі U_0 , яка визначається за формулою

$$U_0 = \frac{U_{HC}}{V - jd}, \quad (46)$$

де $d = \frac{I_R}{I_c}$ - коефіцієнт заспокоєння мережі, рівний відношенню активної складової струму замикання на землю до повного ємнісного струму мережі.

Для повітряних мереж з нормальним станом ізоляції коефіцієнт d дорівнює 2 - 6 % . При забрудненнях та зволоженнях коефіцієнт d може збільшуватися до 10 % .

Для кабельних мереж d дорівнює 2 - 4 % .

Модуль вектора напруги зміщення нейтралі дорівнює

$$U_0 = \frac{U_{HC}}{\sqrt{V^2 + d^2}}, \quad (47)$$

ступінь напруги нейтралі дорівнює

$$V_0 = \frac{V_{HC}}{\sqrt{V^2 + d^2}}. \quad (48)$$

При замиканні на землю в місці пошкодження протікає залишковий струм замикання I_3 (А), рівний

$$I_3 = I_c \sqrt{\frac{V^2 + d^2}{1 + \frac{2d}{d_3} + \frac{V^2 + d^2}{d_3^2}}}, \quad (49)$$

де $d_3 = \frac{U_\Phi}{R_3 I_c}$ - додатковий коефіцієнт заспокоєння;

R_3 - перехідний опір в місці замикання на землю, Ом.

Ємності проводів повітряних ліній визначаються за формулами Максвелла. Для лінії без тросів ємність проводу визначається:

$$C_l = C_{l1} + C_{l2} + C_{l3}, \quad (50)$$

де C_{l1} - власна часткова ємність проводу відносно землі;

C_{l2} та C_{l3} - взаємні часткові ємності відносно другого та третього проводів. Для лінії з тросами у вираз (50) додаються часткові ємності відносно тросів.

Часткові ємності визначаються за формулами:

$$C_{11} = \left| \frac{\Delta_{11}}{\Delta} \right|, \quad C_{12} = \left| \frac{\Delta_{12}}{\Delta} \right|, \quad C_{13} = \left| \frac{\Delta_{13}}{\Delta} \right|. \quad (51)$$

Тут через Δ позначено визначник, що складається з власних та взаємних потенціальних коефіцієнтів :

$$\Delta = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{vmatrix}, \quad (52)$$

де α_{11}, α_{12} і т. д. - алгебраїчні доповнення елементів визначника Δ .

Власні та взаємні потенціальні коефіцієнти розраховуються :

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{2h_k}{r_k}, \quad (53)$$

$$\alpha_{kn} = \frac{1}{2\pi \epsilon_0} \ln \frac{b_{kn}}{\alpha_{kn}}, \quad (54)$$

де h_k - середня висота підвішування проводу в прольоті;

r_k - радіус проводу;

b_{kn} - відстань між k -тим проводом та дзеркальним зображенням проводу (троса) n ;

α_{kn} - відстань між k -тим проводом та проводом (тросом) n ;

$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Відповідно до ПУЕ, електроустановки напругою до 1000 В допускаються як з глухозаземленою, так і з ізольованою нейтраллю.

Для найбільш поширених чотирипроводових мереж трифазного струму напругою 380/220 або 220/127 В, з якими стикається широке коло осіб, ПУЕ вимагають глухого заземлення нейтралі. Такий режим нейтралі виключає значне перевищення номінальної напруги мережі відносно землі.

Напруга відносно землі двох інших фаз, які залишилися в роботі, не перевищить фазної.

В мережах з ізолюваною нейтраллю (рис. 8, а) замикання фази на землю не викликає короткого замикання і не призводить до відключення пошкодженої фази. Мережа буде продовжувати працювати в повнофазному режимі, але при цьому напруги двох непошкоджених фаз відносно землі збільшаться до лінійних значень (рис. 8, б). Оскільки це створить небезпеку для персоналу, то на всіх електроустановках з ізолюваною нейтраллю повинні бути забезпечені контроль ізоляції, швидке виявлення персоналом мережі замикань на землю і швидка їх ліквідація, а при підвищених вимогах безпеки – автоматичне відключення пошкодженої ділянки від мережі.

Електроустановки напругою вище 1000 В, згідно з ПУЕ, поділяються на електроустановки з малими струмами замикання на землю (I_z не більше 500 А), до яких відносяться мережі, які працюють з ізолюваною або компенсованою нейтраллю, та електроустановки з великими струмами замикання на землю (I_z більше 500 А), які працюють з глухозаземленою нейтраллю.

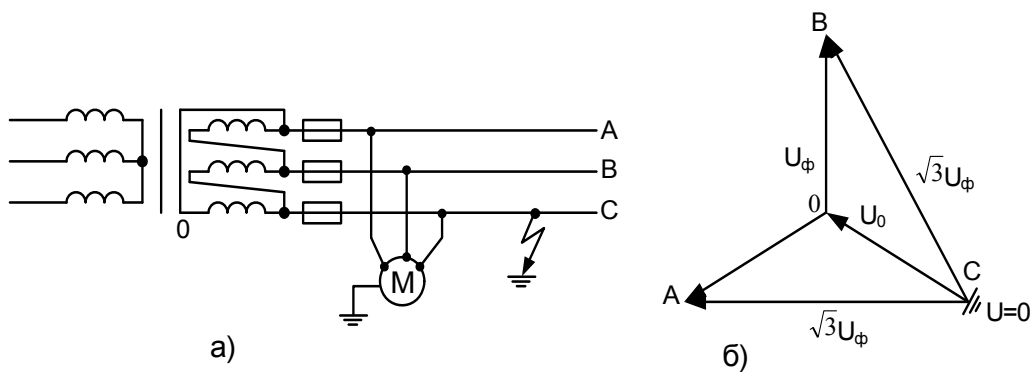


Рисунок 8 - Мережа 660 В з ізолюваною нейтраллю: а - схема; б - векторна діаграма напруг при замиканні фази на землю

Струм однофазного замикання в мережах з ізолюваною нейтраллю визначається частковими ємностями фаз мережі відносно землі і залежать від напруги, конструкції і довжини мережі. В мережах з компенсованою нейтраллю струм замикання на землю обмежується до мінімально можливих значень відповідною настройкою дугогасильної котушки.

В мережах з глухозаземленою нейтраллю при замиканні на землю по заземленій частині електроустановок протікають дуже великі струми короткого замикання і тому повинно бути забезпечено автоматичне

відключення пошкодженої ділянки мережі з найменшим часом відключення. Навпаки, мережі з ізольованою або компенсованою нейтраллю мають важливу перевагу – вони не вимагають негайного відключення пошкодженої ділянки мережі і при однофазних замиканнях на землю, що найчастіше трапляється на практиці, і можуть працювати з заземленою фазою впродовж декількох годин, доки споживача не буде переведено на резервне живлення або підготовлено до припинення подання електричної енергії.

Мережі напругою до 35 кВ включно, як правило, працюють з ізольованою або компенсованою нейтраллю, а мережі напругою 110 кВ і вище – з глухозаземленою нейтраллю.

Мережі з ізольованою нейтраллю.

При замиканні на землю однієї фази, наприклад фази *C* (рис. 9, а), напруга цієї фази відносно землі буде рівною нулю, а напруга двох інших фаз збільшиться в $\sqrt{3}$ раз, і кут зсуву між векторами цих напруг буде 60° (рис. 9, б). Ємнісний струм пошкодженої фази ($U_{\phi C} = 0$) буде рівний нулю, а ємнісні струми кожної непошкодженої фази збільшаться пропорційно збільшенню напруги на ємності і відповідно будуть рівні $\sqrt{3} I_{CA}$ і $\sqrt{3} I_{CB}$. Сумарний струм через ємності непошкоджених фаз $3I_C$, рівний геометричній сумі струмів цих фаз, буде проходити через місце замикання фази *C* на землю, замикаючись через джерело живлення мережі ДЖ.

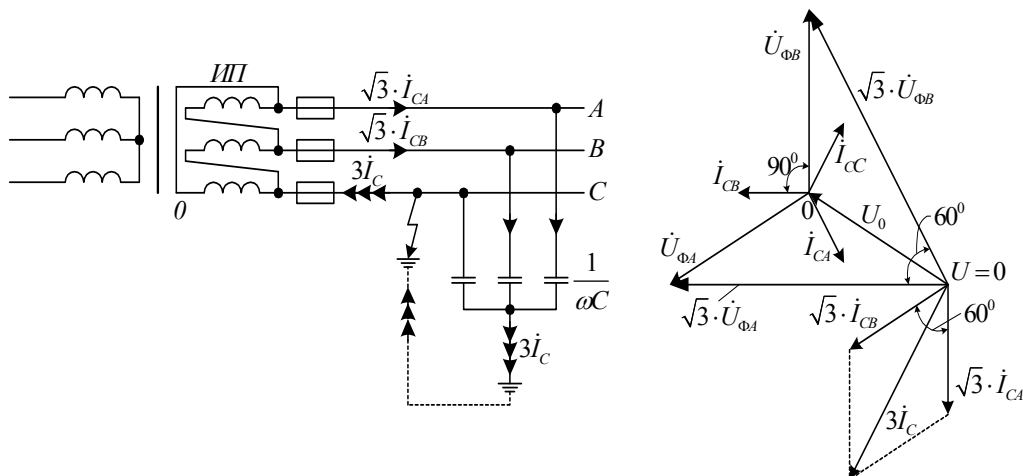


Рисунок 9 – Мережа високої напруги з ізольованою нейтраллю:

а – схема протікання ємнісних струмів в мережі при замиканні фази на землю; б – векторна діаграма напруг і ємнісних струмів в нормальному режимі ($U_0=0$; $I_{cA}=I_{cB}=I_{cC}=U_{\phi}\omega C$) і при замиканні фази *C* на землю ($U_0=U_{\phi}$; $\sqrt{3}\cdot I_{cA}+\sqrt{3}\cdot I_{cB}=3I_C$; $I_{cC}=0$)

Порядок виконання роботи

1. Виміряти фазні та лінійні струми напруги при різних режимах роботи нейтралей за умов симетричного та несиметричного навантаження (відповідно до стенду №2 (див. рис. 2)).
2. Виміряти струми та напруги при граничній несиметрії (відсутність однієї фази в мережі 110 кВ).
3. Порівняти зміну напруг в мережі.
4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Назвіть можливі режими роботи нейтралі.
2. Як змінюється напруга в фазах при пошкодженні мережі?
3. Коли з'являються струми та напруги зворотної та нульової послідовності?
4. Вимоги техніки безпеки при роботі мережі різних режимів нейтралей.
5. Переваги мереж з ізольованою та компенсованою нейтраллю при однофазних замиканнях на землю ?
6. Суть поняття “ гранична несиметрія”.

Лабораторна робота №6
Способи вимірювання ємнісних струмів замикання на землю

Мета: Ознайомитися зі способами вимірювання струмів однофазного замикання на землю та провести порівняльну характеристику при зміні параметрів режиму.

Теоретичні відомості

Вимірювання струмів ОЗЗ може виконуватися одним із способів, перерахованих нижче.

1. Металеве замикання на землю.

Для вимірювання виділяється комірka з масляним вимикачем, в якій монтується тимчасова схема (рис. 10).

Захист масляного вимикача налаштовується на струм не вище 800 А з нульовою витримкою часу. Трансформатор струму з ізоляцією на номінальну напругу мережі вибирається з розрахунком на максимально можливий ємнісний струм при відключених дугогасильних реакторах, але не менше 50/5 і заземлюється типовим переносним заземленням перерізом не менше 25 мм². При необхідності точного визначення ємнісного струму вимірюється активна складова, для чого в схему вводиться ватметр, який підключається до трансформаторів напруги і струму. Вибір перерізу заземлювального провідника повинен проводитись з урахуванням можливості пробоя ізоляції на одній з двох інших незаземлених фаз мережі і появи, внаслідок цього, двофазного КЗ на землю. Статична імовірність появи другого замикання на землю в кабельних мережах 6 - 10 кВ досягає 5 %, в повітряних – не більше 2 %.

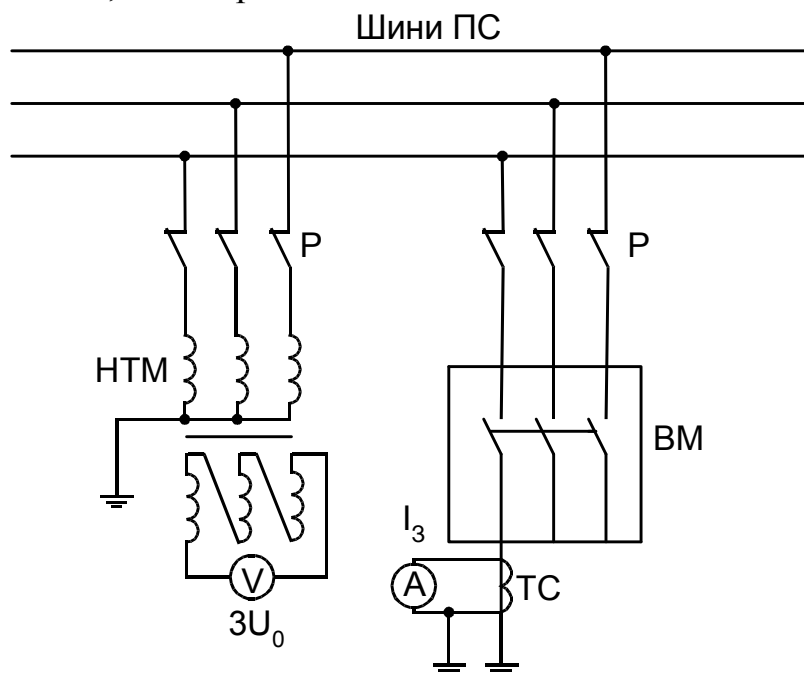


Рисунок 10 – Схема дослідження глухого замикання на землю

Р – роз'єднувачі;

ВМ – виділений для дослідів масляний вимикач, одна фаза якого заземлюється, а дві інші розшиновуються;

ТС – трансформатор струму типу ТПФ;

НТМ – трифазний трансформатор напруги зі вторинною обмоткою, зібраною за схемою розімкненого трикутника.

2. Зміщення нейтралі.

Спосіб універсальний для кабельних мереж 6 - 10 кВ, які мають дугогасильні реактори. Достатньо для проведення періодичних вимірювань мати одну інвентарну установку на підприємстві, яка буде перевозитись на автомашині. Схема установки та її параметри наведені на рисунку 11.

Ємнісний струм замикань на землю розраховуємо за формулою:

$$I_z = I_0 \frac{U_\phi}{U_0}, \quad (55)$$

де I_z – ємнісний струм замикання на землю;

I_0 – струм, що протікає через дугогасильний реактор;

U_0 – напруга на нейтралі;

U_ϕ – номінальна фазна напруга мережі.

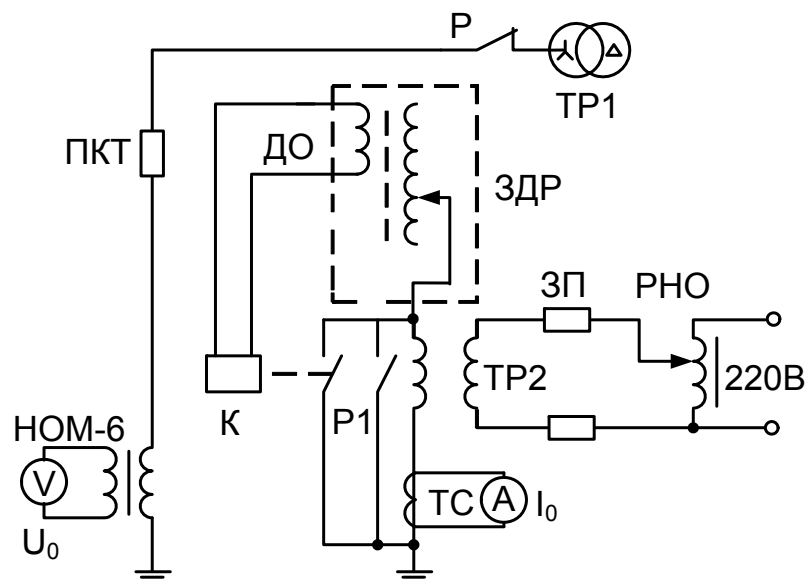


Рисунок 11 – Схема зміщення нейтралі

ТР1 – трансформатор, в нейтраль якого увімкнено заземлювальний дугогасильний реактор;

Р – роз'єднувач;

ЗДР – заземлювальний дугогасильний реактор;

ДО – допоміжна обмотка 100 В, 10 А;

НОМ-6 – трансформатор напругою 6000/100 В, відградуваний разом з вольтметром класу точності 0,5 з межами вимірювань 7,5 - 60 В;

ПКТ – запобіжник високої напруги;

ТР2 – трансформатор зміщення нейтралі масляний потужністю 2 кВ·А, 220/400 В, з обмоткою 400 В, ізолюваною на 5 кВ, виконаний проводом перерізом 10 мм²;

К – магнітний пускач типу ПА-411 з котушкою, перемотаною на 60 В;

РНО – регулятор напруги, 2 кВ·А, 0-250 В;

З – запобіжник 20;

Р1 – однополюсний рубильник на струм 200 А, керований ізолювальною штангою.

Зміщення нейтралі при вимірюваннях повинно бути, по можливості, найбільшим (400-500 В), що легко досягається при налаштуванні ЗДР, близького до резонансу. Для підвищення точності слід зробити декілька вимірювань при різних напругах зміщення нейтралі і зміні фаз живильної схеми напруги. Якщо є паралельно приєднаний другий дугогасильний реактор, то його струм має бути виміряний окремо іншим амперметром; в цьому випадку в розрахункову формулу підставляється сумарний струм.

При появі “землі” в мережі в момент трансформаторних вимірювань зміщення нейтралі шунтується автоматично магнітним пускачем і потім однополюсним рубильником вручну ізолюючою штангою. Схема залишається складеною до ліквідації “землі” в мережі.

Установка може бути змонтована стаціонарно для періодичного контролю настройки дугогасильного реактора, в цьому випадку амперметр і вольтметр замінюються логометром, відградуваним в амперах ємнісного струму.

Визначення струму замикання на землю за резонансною кривою здійснюється шляхом підключення побічної ЕРС в допоміжну обмотку дугогасильного реактора. В допоміжну обмотку ЗДР включається малопотужний понижувальний трансформатор типу ТОС – 380/36 або аналогічний (рис. 12).

Напруга на допоміжній обмотці підтримується незмінною в межах 4 - 24 В регулятором. Індуктивність реактора змінюється ступенями або плавно (залежно від типу реактора), і за показами амперметра будується крива струму в допоміжній обмотці. Якщо дугогасильний реактор має ступінчасте регулювання, то за результатами вимірювань встановлюється найближча відпайка в зоні перекомпенсації. Для реакторів з плавним регулюванням може встановлюватися постійний контроль за налаштуванням.

Для одержання чітко вираженої резонансної кривої необхідно, щоб сумарний опір проводів від трансформатора зміщення до допоміжної обмотки не перевищував 4 Ом. Якщо застосовується стандартний трансформатор безпеки, то його вторинна обмотка повинна бути незаземленою.

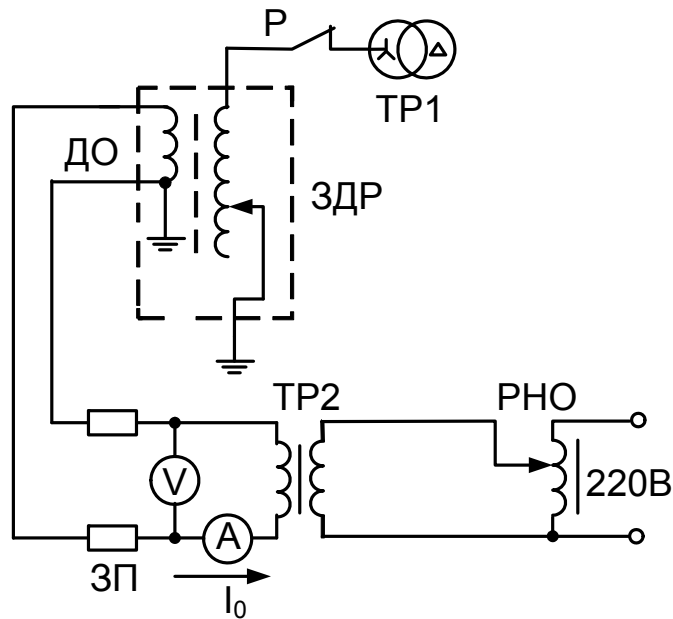


Рисунок 12 – Вимірювання з використанням сторонньої ЕРС. Схема зняття резонансної кривої з живленням від сторонньої ЕРС

Всі дугогасильні реактори з плавним регулюванням можуть бути керованими автоматичними регуляторами налаштування.

Вимірювання резонансним способом можуть застосовуватись і при паралельному включенні двох або більше реакторів. В такому випадку струм паралельно включених апаратів враховується відповідно до їх уставок. Для підвищення точності паралельно включені ЗДР слід відградувати на низькій напрузі (200 - 400 В), близькій до значення напруги зміщення нейтралі при вимірюваннях.

Похибка вимірювань, що виникає через нехтування активною складовою струму ЗДР і кривизну його вольт-амперної характеристики, не перевищує 3 % для кабельних мереж 6 - 10 кВ.

Створення штучної ємнісної несиметрії. Ємнісний струм замикання на землю в мережах з ізолюваною нейтраллю може бути вимірюваний з достатньою точністю шляхом підключення додаткової ємності до однієї з фаз мереж.

Струм замикання на землю визначається за виразом:

$$I_c = \frac{U_k U_l \omega C_d}{U_l - \sqrt{3} U_k}, \quad (56)$$

де U_k - напруга відносно землі на фазі, до якої підключена додаткова ємність;

U_l - лінійна напруга мережі;

ω - кругова частота мережі;

C_d - додаткова ємність.

Значення додаткової ємності, мкФ, яка не викликає значних зміщень нейтралі і достатня для точного розрахунку за формулою, вибирається з умови:

$$C_d = (0,3 \div 0,5) \frac{I_c}{U_{\text{л}}}, \quad (57)$$

де I_c – орієнтовний очікуваний ємнісний струм, А;

$U_{\text{л}}$ – лінійна напруга мережі, кВ.

Порядок виконання роботи

1. Провести вимірювання струмів ОЗЗ при різних конфігураціях розподільної електричної мережі (відповідно до стенду №3 (див. рис. 3) можливими способами.

2. Порівняти результати вимірювань із розрахунковими та зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Від чого залежить величина струму ОЗЗ?
2. Використання методу симетричних складових для розрахунку струмів ОЗЗ.
3. Як впливають струми ОЗЗ на параметри режиму електричної мережі?
4. Методи вимірювання струмів ОЗЗ.
5. Як визначають струми ОЗЗ за резонансною кривою ?
6. Що таке штучна несиметрія ?

Лабораторна робота №7

Компенсація ємнісних струмів

Мета: Ознайомитись з методикою компенсації струмів однофазного замикання на землю в розподільній електричній мережі за допомогою дугогасильних котушок.

Теоретичні відомості

Задача експлуатації полягає в тому, щоб зменшити струм замикання на землю і тим самим забезпечити швидке гасіння заземлювальної дуги для обмеження внутрішніх перенапруг та умов термічної стійкості заземлювачів. Згідно з ПУЕ для цього необхідно, щоб ємнісні струми замикання на землю не перевищували таких величин:

напруга мережі, кВ 6, 10, 20, 35
ємнісний струм, А 30, 20, 15, 10

Однак, досвід показує, що для забезпечення надійного самозгасання дуги в мережах 6 і 10 кВ ємнісні струми доцільно знизити до 20 і 15 А, відповідно. В разі перевищення вказаних значень струмів в нейтраль обмотки трансформатора включається дугогасильна котушка, яка зменшує (компенсує) ємнісний струм через місце пошкодження до мінімальних значень.

Індуктивний струм дугогасильної котушки (відповідно до стенду № 3 (див. рис. 3) - заземлювальний дугогасильний реактор ЗДР) I_K виникає в результаті дії на неї напруги зміщення нейтралі $\dot{U}_O = -\dot{U}_A$, що з'являється в нейтралі при замиканні фази на землю. Струм дорівнює:

$$\dot{I} = j \frac{3 \cdot \dot{U}_\phi}{3\omega \cdot L_K + \omega \cdot L_T}, \quad (58)$$

де U_ϕ – фазна напруга мережі;

L_K і L_T – індуктивності дугогасильної котушки і трансформатора, в нейтраль якого вона включена, Гн.

За допомогою компенсації струмів повітряні і кабельні мережі можуть довгочасно працювати з замиканням фази на землю.

Принципова схема підключення дугогасильної котушки, шляхи протікання ємнісних струмів та векторна діаграма наведені на рисунку 13.

Налаштування дугогасильних котушок.

При $I_K = I_C = I = 0$ ємнісна складова струму в місці замикання на землю повністю компенсується індуктивним струмом котушки – настає резонанс струмів. Дугогасильні котушки, як правило, мають резонансне налаштування, що полегшує гасіння дуги. Відхилення від резонансного

налаштування називають розстроюванням компенсації. На практиці, допускається налаштування з перекомпенсацією ($I_K > I_C$), якщо реактивна складова струму замикання на землю не перевищує 5 А, а ступінь розстроювання $\frac{I_C - I_K}{I_C}$ не перевищує 5 %. Налаштування з недокомпенсацією ($I_K < I_C$) може застосовуватись в кабельних і повітряних мережах, якщо будь-які виниклі аварійно несиметрії ємностей фаз не призводять до виникнення напруги зміщення нейтралі, яка перевищує $0,7U_\phi$.

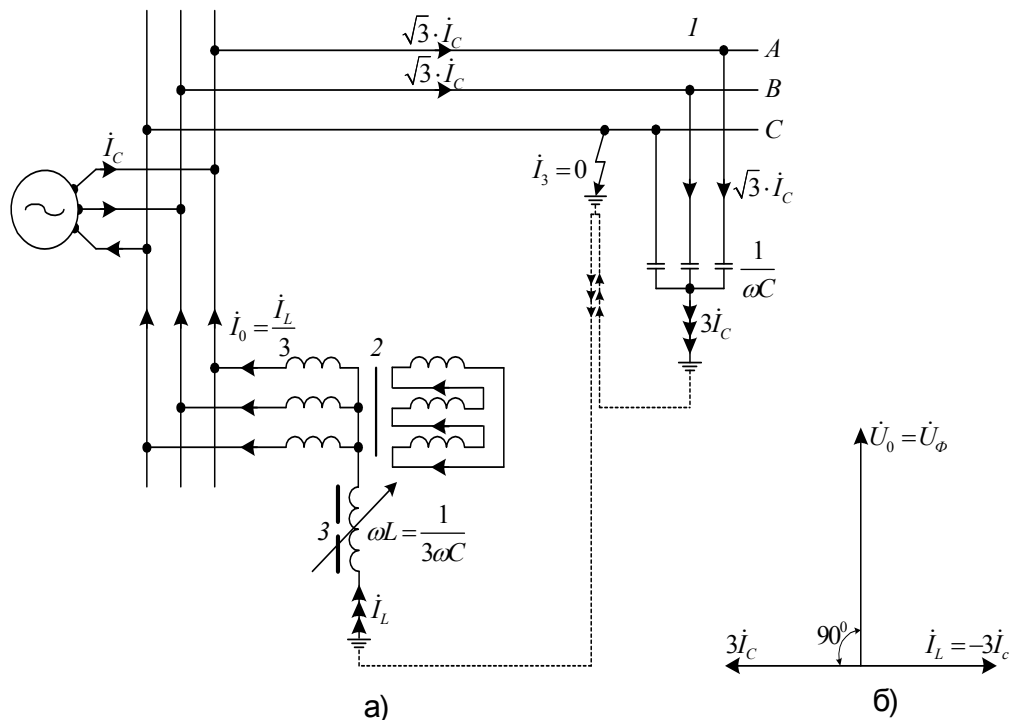


Рисунок 13 – Мережа з компенсованою нейтраллю:

а – схема протікання струмів в мережі при замиканні фази на землю: в пошкодженій фазі $I_C = 0$, в непошкоджених фазах $I_C + I_0 = \sqrt{3} \cdot I_C$, в обмотках заземлювального трансформатора $I_0 = I_L / 3$, в місці замикання $I_3 = 0$;

б – векторна діаграма струмів в місці замикання: 1 – лінія мережі, 2 – заземлювальний трансформатор, 3 – дугогасильна котушка.

Струм замикання на землю визначається розстроюванням компенсації, активними витоками по ізоляції і некомпенсованими струмами вищих гармонік. При резонансному налаштуванні струм замикання мінімальний. I , як показує досвід, перенапруги в мережі не перевищують $2,7 U_\phi$.

При експлуатації повітряних мереж нерідко відступаються від резонансного налаштування, для знешкодження спотворення фазних напруг на шинах підстанцій, що помилково сприймаються персоналом за неповні замикання на землю. Справа в тому, що в будь-якій повітряній мережі 6 - 35 кВ завжди існує несиметрія ємностей фаз відносно землі, що

залежить від розміщення проводів на опорах і розподілення по фазах конденсаторів зв'язку. Це призводить до появи на нейтралі деякої напруги несиметрії $U_{НС}$. Ступінь несиметрії $u_0 = (U_{НС} / U_{\Phi}) \cdot 100$, звичайно, не перебільшує 1,5 %. Для мереж 10 кВ вона, наприклад, складає близько 100 В і в нормальному режимі роботи мережі практично не позначається на зміні напруги фаз.

Включення в нейтраль дугогасильної котушки суттєво змінює потенціали нейтралі і проводів мережі. На нейтралі з'являється напруга зміщення нейтралі U_0 , обумовлена наявністю в мережі несиметрії. Ця напруга буде прикладена до виводів дугогасильної котушки. При резонансному налаштуванні напруга зміщення нейтралі може досягнути значень, близьких до фазної напруги. Це призведе до спотворення фазних напруг і навіть появи сигналу „земля в мережі”, хоча замикання на землю в цей час і відсутнє. Розстроюванням дугогасильної котушки вдається відійти від точки резонансу (коливальний контур створюється індуктивністю котушки і сумарною ємністю фаз мережі), знизити напругу зсуву нейтралі і вирівняти покази вольтметрів. При відсутності замикання на землю в мережі зсув нейтралі допускається не більше $0,15U_{\Phi}$. Однак, з точки зору гасіння дуги, оптимальним все ж таки є резонансне налаштування. Будь-яке розстроювання компенсації призводить до збільшення струму, що проходить в місці пошкодження в режимі роботи мережі з замиканням на землю, і тому не рекомендується. При великому зсуві нейтралі потрібно вжити заходів, направлених на зменшення несиметрії ємностей в мережі. В кабельних лініях застосовується виключно резонансне налаштування, оскільки ємності фаз кабелів симетричні і напруга несиметрії там практично відсутня.

Порядок виконання роботи

1. Виміряти струми ОЗЗ при зміні положень вимикачів QS10 – QS13 та QS4 (відповідно до стенду № 3 (див. рис. 3)).
2. Підключити ЗДР та виміряти струми компенсації при ступінчастій зміні кількості витків.
3. Оцінити результати компенсації.
4. Зробити висновки.

Контрольні запитання

1. Умови вибору ДГР.
2. Несиметрія струмів та напруг при ОЗЗ.
3. Як впливають струми ОЗЗ на термічну стійкість заземлювачів?
4. На що впливає включення в нейтраль дугогасильної котушки?
5. Що таке розстроювання компенсації ?
6. Методи компенсації ємнісних струмів ОЗЗ.

Лабораторна робота №8

Визначення кута діелектричних втрат

Мета роботи: вивчення методики та пристрою для визначення тангенса кута діелектричних втрат, відпрацювання навичок оцінювання стану ізоляції за тангенсом кута діелектричних втрат.

Теоретичні відомості

У кабельній техніці доводиться вимірювати повні комплексні опори зразків. Для кабелів зв'язку ці опори можуть мати як ємнісний, так і індуктивний характер. При вимірюванні характеристик електроізоляційних матеріалів використовуються послідовна і рівнобіжна схеми заміщення зразків з діелектриком або відрізків кабелів (рис. 14).

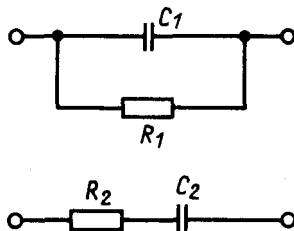


Рисунок 14 – Схеми заміщення вимірюваних зразків

Тангенс кута діелектричних втрат

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p, \quad (59)$$

де I_a , I_p – активна і реактивна складові струму.

Показником, який характеризує структуру і якість ізоляції, є тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$. Таким чином, при змінному струмі через ізоляцію протікає геометрична сума струмів: ємнісний струм, струм абсорбції, струм наскрізної провідності. Геометрична сума їх показана на рисунку 16. Сумарний струм розкладений на дві складові I_a та I_c , відношення яких характеризується $\operatorname{tg} \delta$. Векторна діаграма має вигляд:

Зменшення $\operatorname{tg} \delta$ можна досягти за рахунок підсушування ізоляції, центрифугування масла. Контроль якості ізоляції також можна проводити приладом контролю вологості ПКВ-7, а для рідкої ізоляції трансформаторів і вводів - хроматографічним аналізом масла.

Кут діелектричних втрат ϵ , в першу чергу, показником наявності в ізоляції сторонніх включень, вологи та пари, шаруватості або монолітності її структури. Розшарування ізоляції призводить до іонізації повітря в проміжках між шарами і відповідно до збільшення втрат в ізоляції. Таким чином, $\operatorname{tg} \delta$ показує скільки відсотків складає активна складова струму від ємнісної.

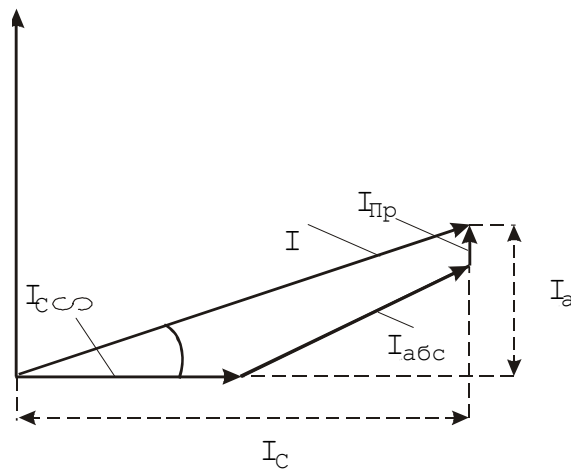


Рисунок 15 – Векторна діаграма

Під ємністю, при включенні в ланцюг деякого комплексного опору, розуміють величину, що визначає реактивний струм у колі:

$$C_x = I_p / (\omega U). \quad (60)$$

При цьому ємність паралельної схеми відповідає ємності, визначеній за (60).

Для послідовної схеми заміщення справедливі співвідношення

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_2 R_2; \quad (61)$$

$$I_p = U \omega C_2 / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (62)$$

Підставивши I_p з (61) у (62), одержимо формулу для C_x :

$$C_x = C_2 / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (63)$$

Отже, якщо розрахункові формули вимірювальної схеми приладу отримані для послідовної схеми заміщення, то отриману ємність C_x необхідно перерахувати за (63). Якщо $\operatorname{tg} \delta < 0,1$, то значення $(1 + \operatorname{tg}^2 \delta)$ близьке до 1 і $C_x = C_1 = C_2$. При великих значеннях $\operatorname{tg} \delta$ співвідношенням (63) нехтувати не можна.

При вимірюваннях ємності зразків діелектрика і кабелю застосовують електроди, показані на рисунках 14 і 16.

Ємність таких зразків обчислюється відповідно за формулами

$$C_x = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\pi d_1^2}{4} (1 + Bg); \quad C_x = \frac{2\pi \varepsilon \varepsilon_0}{\ln(R/r_0)} (1 + Bg), \quad (64)$$

де ε – відносна діелектрична проникність матеріалу;

ϵ_0 – електрична стала ($8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);
 r_0 – зовнішній радіус жили кабелю;
 R – радіус по ізоляції кабелю (внутрішній радіус зовнішнього електрода);
 l – довжина зразка кабелю;
 g – зазор між вимірювальним і охоронним електродом;
 B – коефіцієнт, що враховує перекичування електричного поля на краях електрода.

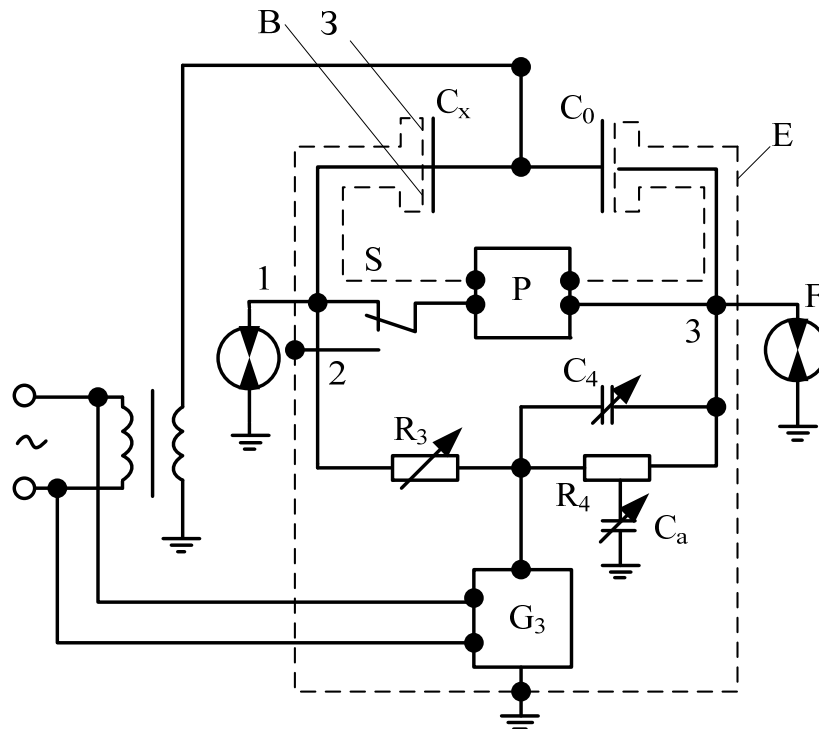


Рисунок 16 – Схема моста з захисною напругою
 B – вимірювальний електрод; 3 – заземлений електрод

Якщо товщина електродів а більша товщини зразка Δ , то $B = 1$.
 Якщо $a < \Delta$, то B розраховують за формулою

$$B = 1 - 2,932 \frac{\Delta}{g} \lg \operatorname{ch} \left(0,7854 \frac{g}{\Delta} \right). \quad (65)$$

Втрати енергії у біляелектродних шарах повинні бути набагато менші втрат у діелектрику. Зокрема, при використанні електропровідних мастил або при окисленій поверхні електродів електричний опір біляелектродного шару r_e має задовольняти співвідношення

$$\omega r_e C_x \ll \operatorname{tg} \delta_x. \quad (66)$$

При вимірюваннях на високих частотах індуктивність з'єднувальних проводів (їхня довжина) має бути мінімальною. При вимірюваннях зразків невеликої ємності і при малих значеннях $\operatorname{tg} \delta$ необхідно ретельне екранування вимірювальних схем і зразків для захисту від зовнішніх перешкод.

При вимірюваннях ϵ і $\operatorname{tg} \delta$ матеріалів за двохелектродною системою (коли електрод 3 на рисунку 17 відсутній) необхідно враховувати ємність крайового ефекту електродів. При вимірюваннях ϵ і $\operatorname{tg} \delta$ на тонких плівках великі похибки можуть бути внесені внаслідок впливу біяелектродних прошарків. У цьому випадку можна застосовувати метод вимірювання в рідкому діелектрику та у газі (метод двох середовищ). При цьому простір між електродами і твердим діелектриком заповнюється газом чи рідиною.

Вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат при частоті 50 Гц, як правило, виконують при підвищеній напрузі. Загальні вимоги при вимірюваннях регламентовані ГОСТ 12179-76. У кабельній техніці вимірюють не тільки тангенс кута діелектричних втрат, але і його приріст при підвищенні напруги від половини номінальної до дослідної. За цією характеристикою роблять висновок про наявність газових включень в ізоляції кабелю. Вимірюють також залежність ємності і тангенса кута діелектричних втрат від температури.

При напрузі до 10 кВ для компенсації впливу з'єднувальних проводів і екранів застосовують схеми з захисною напругою (див. рис. 16). Основний міст у схемі складається з C_x , C_0 , R_3 , R_4 з C_4 і працює в положенні 1 перемикача S. При рівновазі моста виконується рівність

$$Z_x Z_4 = Z_0 Z_3, \quad (67)$$

де $Z_x = 1 / (1/R_x + j\omega C_x)$ – паралельна схема заміщення;

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{1}{j\omega C_0}; \\ Z_3 &= R_3; \\ Z_4 &= 1 / \left(\frac{1}{R_4} + j\omega C_4 \right). \end{aligned}$$

Підставивши значення комплексних опорів у (67) і прирівнявши дійсні і уявні частини рівняння, одержимо

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad \operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4. \quad (68)$$

Зразковий конденсатор C_0 повинен мати $\operatorname{tg} \delta_0$ близьким до нуля. Зазвичай він виконується з газоподібними діелектриками і його ємність

приблизно дорівнює 100 пФ. Елементи R_3 і C_4 виготовлені у вигляді декадних магазинів опорів і ємностей, $R_4 = 10^4/\pi$ Ом. Тоді з (68) випливає, що $\operatorname{tg}\delta = C_4 \cdot 10^6$. Таким чином, $\operatorname{tg}\delta = 1$ при $C_4 = 1$ мкФ. Шкала приладу градуйована безпосередньо в значеннях $\operatorname{tg}\delta$.

Як індикатор рівноваги P використовують вібраційний гальванометр із підсилювачем або магнітоелектричний прилад з підсилювачем. Зрівноважування моста починають з регулювання R_3 до мінімуму показань P . Потім регулюють C_4 до мінімуму показань P . Далі знову переходять до регулювання R_3 і т.д. до тих пір, поки міст не буде врівноважений при найвищій чутливості P .

Переключають S у положення 2 і проводять врівноважування шляхом регулювання захисної напруги блока G_3 . При цьому, послідовно регулюють напругу блока G_3 за значенням і фазою, намагаючись досягти нульового значення P . Потім знову переключають S у положення 1 і регулюють основний міст. При повній рівновазі P повинен показувати нуль при обох положеннях перемикача S . У цьому випадку напруга на точках 1 і 3 дорівнює нулю, і струм між з'єднувальними проводами та екранами E відсутній. Отже, ємність і діелектричні втрати в з'єднувальних проводах не впливають на результати вимірювань.

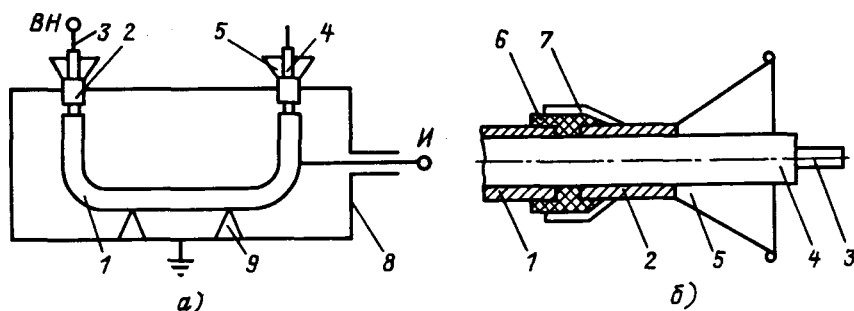


Рисунок 17 - Підключення кабелю до вимірювальної схеми:
1 – оболонка; 2 – охоронний електрод; 3 – жила; 4 – ізоляція кабелю; 5 – металевий конус для вирівнювання електричного поля; 6 – додаткова ізоляція; 7 – фольга; 8 – екран; 9 – ізолятор

Розрядники F сигналізують про наявність у точках 1 і 3 напруги понад 300 В. Це може бути не тільки при пробі C_x , але й у тому випадку, коли встановлений зразок з великою ємністю й опір R_3 досить великий. Кабелі підключаються відповідно до рисунку 17, а). Конструкція охоронного електрода показана на рисунку 17, б). Конденсатор C_a служить для симетрування схеми при загальному регулюванні приладу.

Для вимірів використовують мости P5254 і P5026. Міст P5026 придатний для вимірювання ємностей від 10 до $5 \cdot 10^8$ пФ. Деякі характеристики моста P5026 наведені в таблиці 4.

Таблиця 4 – Характеристики моста Р5026 у діапазоні вимірів від 10 до 10^6 пФ

Діапазон вимірювань C_x , пФ	$\text{tg } \delta$	Основна допустима похибка %		Робоча напруга, кВ
		C_x	$\text{tg } \delta$	
$10 - 10^3$	$1 \cdot 10^{-4} - 0,1$	± 1	$\pm(0,01 \text{tg } \delta + 2 \cdot 10^{-2})$	$5 - 10$
$10^2 - 10^5$	$1 \cdot 10^{-4} - 0,1$	± 1	$\pm(0,01 \text{tg } \delta + 1 \cdot 10^{-4})$	$3 - 10$
$10^5 - 10^6$	$5 \cdot 10^{-4} - 0,1$	± 1	$\pm(0,025 \text{tg } \delta + 2 \cdot 10^{-4})$	$3 - 5$

При вимірюванні великої ємності (у випадку будівельних довжин кабелів) і при напрузі більше 10 кВ через резистор R_3 протікають великі струми і його шунтують невеликими зразковими опорами R_3 підвищеної потужності.

В даній лабораторній роботі використовується міст змінного струму Р5026М. В мості використана схема Шерінга, яка дозволяє проводити вимірювання ємності C_x та $\text{tg} \delta$: за “прямою” схемою рис. 18; за “перевернутою” схемою рис. 19.

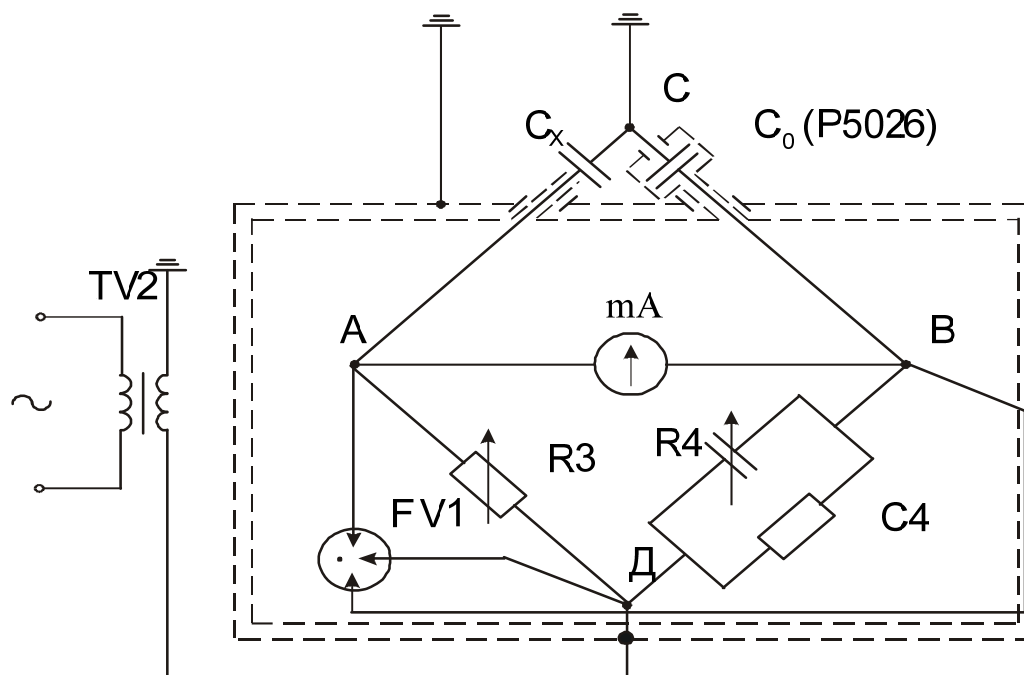


Рисунок 18 - Схема електрична принципова при вимірюванні за “прямою” схемою з Р5026

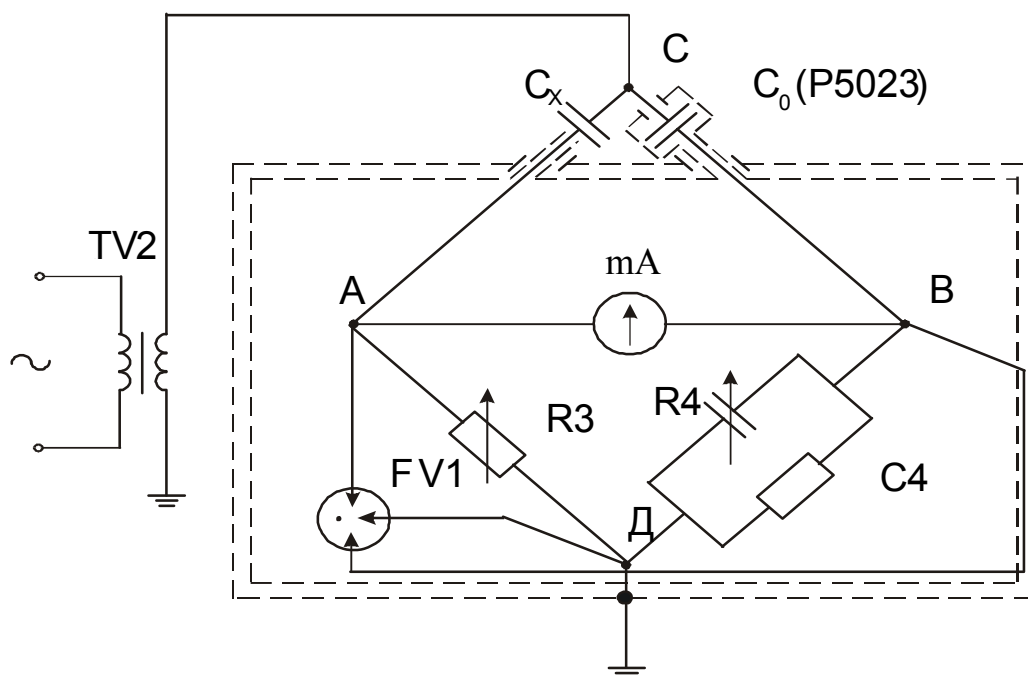


Рисунок 19 - Схема електрична принципова при вимірюванні за “перевернутою” схемою з P5026

Для компенсації впливу сполучних проводів при високій напрузі використовують схему з захисним колом (рис. 18).

Якщо один з електродів зразка C_x заземлений (оболонка кабелю), то вимірювання можна робити за “перевернутою” схемою (рис. 19).

Формули для визначення C_x і $\text{tg}\delta$ мають вигляд:

$$C_x = \frac{R_4}{R_3} \cdot C_o, \quad (69)$$

де R_3 – відлік на основному блоці, Ом;

R_4 – значення опору R_4 , Ом;

C_o – діюче значення ємності конденсатора, вказане в свідоцтві.

$$\text{tg}\delta = 6,283 \cdot f \cdot R_4 \cdot C_4, \quad (70)$$

де C_4 – відлік на основному блоці, мкФ;

f – робоча частота, Гц.

Для вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат при частотах $10^3 - 10^6$ Гц за допомогою мостів у схемах застосовують як екранування кожного елемента схеми, так і екранування всієї схеми в цілому. Коли один з електродів зразка заземлений, застосовують метод вимірювання і підключення зразка, аналогічний наведеному на рис. 19, у тому числі і за відсутності охоронного електрода. При цьому, $C_{\text{п}}$

підключений паралельно вимірюваному зразку C_x рис. 20, а. Вимірювання проводять двічі: при включеному і відключеному зразку C_x .

Для випадку, коли обидва електроди вимірюваного зразка незаземлені, схема підключення конденсаторів між електродами і заземленням показана на рис. 20, б.

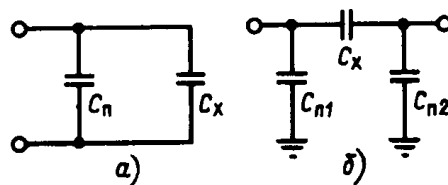


Рисунок 20 – Схема для обліку ємності сполучних проводів

Параметри деяких мостів, що випускаються промисловістю, наведені в таблиці 5. Напруга при вимірах не перевищує 100 В. Мости Е7-8, Е8-4, Р589, Р5010, Р5016 – цифрові автоматичні.

Таблиця 5 – Мости змінного струму

Міст	С, пФ	tg δ	Частота , Гц	Похибка вимірювання	
				С	tg δ
1	2	3	4	5	6
Цифровий Е7-8	$0,01-10^8$	$10^{-4}-1$	10^3	$0,001C$	$0,005 \text{ tg}\delta + 5 \cdot 10^{-4}$
Цифровий Е8-4	$0,3-1,5 \cdot 10$	$5 \cdot 10^{-4}-0,1$	10^3	$0,001C+0,02$	$0,02 \text{ tg } \delta + 5 \cdot 10^{-4}$
Цифровий Р589	10^2-10^7 $0,01-100$	$5 \cdot 10^{-4}-0,1$	10^3	$0,001C$ $0,001C+0,02/C$	$0,02 \text{ tg } \delta + 3 \cdot 10^{-4}$ Не нормується
Цифровий Р5010	$0,1-10^8$	$0-0,05$	–	$0,005C$	$0,02 \text{ tg } \delta + 1 \cdot 10^{-3}$
Цифровий Р5016	$10^2 - 10^8$	$1 \cdot 10^{-4}-1$	$1 \cdot 10^3$; $5 \cdot 10^3$; $1 \cdot 10^4$; $5 \cdot 10^4$	$(0,0002-0,002) C$	$0,01 \text{ tg } \delta + 5 \cdot 10^{-4}$
МЛЕ-7АМ	$10-10^7$	$2 \cdot 10^{-4}-0,05$	10^3	$0,001C+0,2$	$0,05 \text{ tg } \delta + 2 \cdot 10^{-4}$
МЛЕ-9А	$0,1-30$	$(2-30) \times 10^{-4}$	10^6	$0,02C+0,05$	2×10^{-4}
МЛЕ-12П	$10-10^3$	$2 \cdot 10^{-5}-0,001$	10^3	$0,005C$	$0,02 \text{ tg } \delta + 2 \cdot 10^{-5}$
Р571М	$10-10^8$	$10^{-3}-2$	$50-10^4$	$0,001C+15$	$0,05 \text{ tg } \delta + 5 \cdot 10^{-4}$

Продовження таблиці 5

1	2	3	4	5	6
УМЕ-10А	$1 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^{-5} - 0,1$	$40 \cdot 10^5$	$(0,00001 - 0,001)C$	$10^{-6} - 2 \cdot 10^{-4}$
УМЕ-11	$1 \cdot 10^3$	$(1 - 300)10^{-4}$	$10^5 - 10^7$	$(0,001 - 0,002)C$	$2 \times 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-4}$
Е7-11	$0,5 \cdot 10^3$	$0,005 - 0,1$	$100; 1000$	$(0,01 - 0,02)C$	$0,1 \text{tg} \delta + 0,005$

Порядок виконання роботи

1. Під'єднати об'єкт вимірювання (C_X).
2. Подати напругу на TV1 (рис. 21) та встановити відповідний рівень напруги на TV2.

3. Перевірити положення чи встановити на основному блоці: ручку “Чутливість” – в положення “0”; ручки набору R_3 – в положення “ 50Ω ”; ручки ряду C_4 – в положення “ $0,001 \mu F$ ”; ручку перемикача SA2 – в положення “1” (+tg δ); ручку перемикача SA1 – в положення очікуваного значення вимірюваної ємності при роботі на високій напрузі.

Ввімкнути тумблер “Мережа” основного блока. При цьому, повинна загорітись лампочка освітлення шкали мікроамперметра.

Встановити положення, при якому стрілка мікроамперметра найближча до нульової відмітки шкали, почергово регулюючи опір ряду R_3 і ємності C_4 , збільшуючи при цьому чутливість показчика рівноваги.

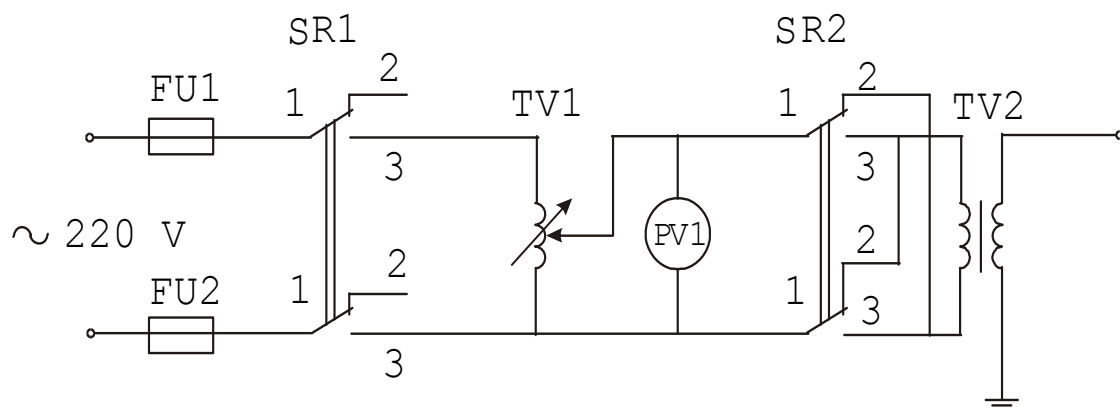


Рисунок 21 – Схема включення випробувального трансформатора

Встановити ручку “Чутливість” в таке положення, при якому стрілка мікроамперметра відхилиться на 20-30 мікроампер.

Врівноваження моста потрібно закінчувати в такому положенні ручки “Чутливість”, при якому зміна наборів на R3 або C4 на величину, рівну половині межі допустимої основної похибки вимірювань викликає відхилення стрілки мікроамперметра не менше ніж на 0,5 мм.

Записати значення наборів R3 і C4, положення перемикачів R4, SA1 і SA2 на основному блоці і перемикача полярності SA2.

Зменшити чутливість показчика рівноваги і перевести перемикач полярності SA2 в інше положення (+tgδ). Провести додаткове регулювання R3 і C4 і записати отримані дані.

Обчислити значення ємності і тангенса кута втрат за формулами (75), (76). Дійсне значення ємності визначити як середнє арифметичне за формулою (75):

$$C_x = \frac{C_{x1} + C_{x2} + C_{x3} + C_{x4}}{4}, \quad (75)$$

де C_{x1} , C_{x2} , C_{x3} , C_{x4} – значення визначені за результатами окремих вимірювань.

Дійсне значення тангенса кута діелектричних втрат визначити як середнє арифметичне за формулою:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \frac{\operatorname{tg} \delta_{x1} + \operatorname{tg} \delta_{x2} + \operatorname{tg} \delta_{x3} + \operatorname{tg} \delta_{x4}}{4}, \quad (76)$$

де $\operatorname{tg} \delta_{x1}$, $\operatorname{tg} \delta_{x2}$, $\operatorname{tg} \delta_{x3}$, $\operatorname{tg} \delta_{x4}$ – значення тангенса кута діелектричних втрат, розраховані за формулою (70) та результатами окремих вимірювань.

При наявності сильних впливів електричного поля рівновага моста може наставати лише при установці перемикача полярності в положення (- tgδ). При цьому магазин ємності C4 від’єднується від плеча R4 і підключається паралельно плечу R3 мостової схеми. Величину $\operatorname{tg} \delta_x$ в цьому випадку потрібно обчислювати за формулою:

$$-\operatorname{tg} \delta_x = 6.28 f R_3 C_4 \cdot 10^{-6}. \quad (77)$$

Формула дійсна тільки для положення “1” перемикача діапазону SA1.

Контрольні запитання

1. Дайте означення поняття “діелектричні втрати”.
2. Якими показниками характеризуються діелектричні властивості трансформаторного масла?

3. Принцип побудови векторної діаграми для визначення тангенса кута діелектричних втрат.
4. Назвіть причини виникнення струмів абсорбції.
5. Яким шляхом можливо досягти зміни струму абсорбції?
6. Методи вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат.
7. За якими показниками можна оцінити стан ізоляції ?
8. Наведіть схему моста з захисною напругою та принцип її дії.
9. Для чого використовують схему Шерінга ?

Словник найуживаніших термінів

Баланс активної потужності – active power balance
Баланс реактивної потужності – reactive power balance
Відхилення напруги – voltage deviation
Відхилення частоти – frequency error
Втрата напруги – voltage loss
Втрати потужності – power loss
Джерело живлення – electric power supply
Ємнісний опір конденсаторної батареї – capacitive resistance of bank of capacitors
Закон регулювання напруги – law of voltage control
Затискачі електроспоживачів – binders of power consumer
Коефіцієнт зворотної послідовності напруги – reverse-sequence voltage ratio
Коефіцієнт несинусоїдальності напруги – voltage nonsinusoidality ratio
Коефіцієнт нульової послідовності напруги – zero-sequence voltage ratio
Коефіцієнт спотворення форми кривої напруги – voltage waveform distortion factor
Коефіцієнт трансформації – transformation ratio
Коливання напруги – voltage fluctuation
Конденсаторна батарея – bank of capacitors
Лінійний регулятор – linear control
Лінія електропередач – power transmission line
Місцева мережа – local power network
Оптимізація – optimization
Параметри режиму – regime parameters
Підстанція – substation
Показник якості електричної енергії – quality index of electrical energy
Потокорозподіл – power flow
Потужність конденсаторної батареї – power of bank of capacitors
Районна мережа – regional power network
Регулювальний пристрій – adjusting device
Розмах змінення напруги – range of voltage changing
Розмах коливань частоти – range of frequency fluctuation
Розподільна електрична мережа – distributing electrical network
Силовий трансформатор – power transformer
Синхронний двигун – synchronous motor
Синхронний компенсатор – synchronous compensator
Централізоване регулювання напруги – centralized voltage control
Якість електричної енергії – quality of electrical energy

Література

1. Правила устройства электроустановок. / Минэнерго СССР. – 6-е издание, перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 648 с.: ил.
2. Справочник по проектированию электрических сетей и оборудования / Под ред. Ю. Г. Барыбина и др. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 464 с.: ил.
3. Справочник по проектированию электроснабжения / Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самоверова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1980. – 456 с.: ил.
4. Козлов В. А., Билык Н. И., Файбисович Д. Л. Справочник по проектированию электроснабжения городов. - Л., 1985.
5. Клязевский Б. А., Липкин Б. Ю. Электроснабжение промышленных предприятий. - 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1986. – 240 с.
6. Будзко В. А., Левин М. С. Электроснабжение сельскохозяйственных предприятий и населённых пунктов. - М., 1985. – 265 с.
7. Электротехнический справочник в 3-х т. Т.3. в 2-х кн. Кн. 1. Производство и распределение электрической энергии (Под общ. ред. профессоров МЭИ: И. Н. Орлова (гл. ред.) и др.) - 7-е изд., испр. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 880 с.: ил.
8. Справочник по проектированию электроэнергетических систем / Е. Е. Ершевич, А. Н. Зайлигер, Г. А. Илларионов и др. / Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – 3-е изд., перераб и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
9. Ермилов А. А. Основы электроснабжения промышленных предприятий. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: «Энергия», 1969. – 304 с.
10. Веников В. А., Глазунов А. А. Электрические сети. – М.: Высшая школа, 1971. – 437 с.
11. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для электроэнергетических специальностей / Под ред. В. М. Блок. – М.: Высшая школа, 1990. – 383 с.: ил.
12. Пособие по проектированию городских и поселковых электрических сетей. - М., 1987. – 280 с.
13. Гук Ю. Б. Анализ надёжности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.: ил.
14. Боровиков В. А. и др. Электрические сети энергетических систем. – Л.: «Энергия», 1977, - 292 с.: ил.
15. Режимы нейтрали электрических сетей / Сирота И. М., Кисленко С. Н., Михайлов А. М. - Київ: Наук. думка, 1985. - 264 с.

Навчальне видання

**Головатюк Микола Олександрович
Остапчук Жанна Іонівна
Собчук Наталія Валеріївна**

РОЗПОДІЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ

Лабораторний практикум

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено М. Головатюком

Підписано до друку
Формат 29,7×42 ¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. .
Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.