

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

АЕРОКОМСІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ТА
ТЕХНОЛОГІЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри

Квасніков В.П.

«__» _____ 2020 __ р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

(пояснювальна записка)

ВИПУСКНИКА ОСВІТНЬО-КВАЛІФІКАЦІЙНОГО РІВНЯ

«МАГІСТР»

Тема: « Моніторинг стану ізоляції високовольтного обладнання»

Виконавець: _____ студент групи ЕС-214М Держак Даниїл Ігорович

Керівник: _____ д.т.н., доцент, Орнатський Дмитро Петрович

Нормоконтролер: _____ к.т.н., Катаєва М.О.

Консультант розділу «Охорона праці»: _____ к.т.н., Ударцева Т.Є.

Консультант розділу «Охорона навколишнього середовища» _____ д.т.н. Гай С.М.

Київ 2020

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Аерокосічний факультет

Кафедра комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій

Напрямок (спеціальність) 6.050701 «Електротехніка та електротехнології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПДС

_____ Квасніков В.П.

«__» _____ 2020р.

ЗАВДАННЯ

На виконання дипломної роботи

_____ Деркач Даниїл Ігорович _____

Тема дипломної роботи : Моніторинг опору ізоляції високовольтного обладнання.

Затверджена наказом ректора від «__» грудня 2020 р. №__ _____

2. Термін виконання роботи : з 05. 10. 20. р. по 21. 12. 20. р.

3. Вихідні дані до роботи : діапазон вимірювання (10..100) кОм, клас точності 0,1.

4. Зміст пояснювальної записки: вимір діелектричних характеристик, вимірювальний перетворювач опору ізоляції для установок, які знаходяться під напругою.

Перелік обов'язкового графічного (ілюстративного) матеріалу: структурна схема вимірювання стану ізоляції високовольтного обладнання, логометрична схема вимірювання стану ізоляції високовольтного обладнання, графік залежності вимірюваного опору до опору обладнання.

6.Календарний план-графік

№ пор.	Завдання	Термін виконання	Відмітка про виконання
1.	Огляд методів контролю ізоляції в високовольтному обладнанні	05.10.20- 07.10.20	виконано
2.	Моделювання схеми для контролю стану ізоляції	07.10.20- 08.10.20	виконано
3.	Аналіз похибки вимірювання	15.11.20- 16.11.20	виконано
4.	Оформлення і узагальнення висновків за результатами роботи	20.11.20- 28.11.20	виконано
5.	Оформлення дипломної роботи	30.11.20- 10.12.20	виконано

7.Консультація з окремих розділів:

Назва розділу	Консультація (посада, П. І. Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона навколишнього середовища	Гай Анжела Євненівна		
Охорона праці	Занько Сергій Михайлович		

Дата видачі завдання « 05 » жовтня 2020р.

Керівник дипломної роботи _____ Орнатський Д.П.

Завдання прийняла до виконання _____ Деркач Д.І.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Моніторинг стану ізоляції високовольтного обладнання»: 87 сторінок, 30 рисунків, 2 таблиці, 20 використаних джерел.

Об'єкт дослідження – процес прецизійного дистанційного контролю стану ізоляції електроенергетичного обладнання під напругою.

Предмет – методи та засоби контролю стану ізоляції високовольтних установок, що знаходяться під напругою.

Мета дипломної роботи – створити схему контролю стану ізоляції електроенергетичного обладнання під напругою з підвищеними техніко-економічними характеристиками.

Завданням роботи є аналітичний огляд контролю стану ізоляції у високовольтному обладнанні (в робочому стані), розробка структурної схеми для контролю стану ізоляції високовольтного обладнання, що знаходиться під напругою, розробка функціональної схеми вимірювального каналу, моделювання вимірювального каналу в програмному середовищі Electronic Workbench, розробити висновки.

ІЗОЛЯЦІЯ, ДІЕЛЕКТРИЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА, ВИМІРЮЮЧИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, МОДЕЛЮВАННЯ, МЕТОДИ КОНТРОЛЮ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	8
ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1 ВИМІР ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК.....	10
1.1. Основні методи контролю діелектричних характеристик ізоляції.....	10
1.2. Нерівноважний – компенсаційний метод.....	16
1.3. Ватметровий метод	31
1.4. Мостовий метод	33
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ.....	40
2.1. Методи негативного зворотного зв'язку	40
2.2. Основні методи зменшення похибок.....	40
2.3. методи допоміжних вимірювань.	44
2.4. Методи зразкових зір.....	45
2.5. Ітераційні методи	45
2.6. Тестові методи.....	50
РОЗДІЛ 3 ВИМІРЮЮЧИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ ДЛЯ УСТАНОВОК, ЯКІ ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД НАПРУГОЮ	56
3.1. Вимірюючий перетворювач.....	56
3.2. Проектування вимірювального перетворювача.....	60
РОЗДІЛ 4	Ошибка! Закладка не определена.
ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	Ошибка! Закладка не определена.
4.1. Релейний захист і автоматика.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.2. Контроль і профілактика пошкоджень ізоляції	Ошибка! Закладка не определена.
4.3. Захист від випадкового дотику до струмопровідних частин.....	Ошибка! Закладка не определена.
4.4. Компенсація ємностей складової струму замикання на землю	Ошибка! Закладка не определена.
4.5. Захисне відключення	Ошибка! Закладка не определена.

Висновки **Ошибка! Закладка не определена.**

РОЗДІЛ 5 **Ошибка! Закладка не определена.**

ОХОРОНА ПРАЦІ **Ошибка! Закладка не определена.**

5.1. Аналіз шкідливих та небезпечних виробничих факторів при
обслуговуванні високовольтного електрообладнання

..... **Ошибка! Закладка не определена.**

5.2. Організаційні та конструктивно-технологічні заходи для зниження впливу
шкідливих виробничих факторів..... **Ошибка! Закладка не определена.**

5.3. Розрахунок враження людини електричним струмом **Ошибка! Закладка не
определена.**

5.4. Забезпечення пожежної та вибухової безпеки при обслуговуванні
електричного обладнання генератора

..... **Ошибка! Закладка не определена.**

5.5. Інструкція з охорони праці при обслуговуванні електричного обладнання
генератора

..... **Ошибка!**

Закладка не определена.

ВИСНОВКИ..... **Ошибка! Закладка не определена.**

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ **Ошибка! Закладка не определена.**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЕРС – електрорушійна сила

ОП – операційний підсилювач або зворотній перетворювач

ТН – трансформатор напруги

РУ – розподільчий пристрій

УР – вказівник рівноваги

СИ – основний спосіб вимірювань

ВУ – обчислювальний пристрій

БМТ – блок формування мультиплікативного тесту

ДП (ДУ) – диференційний підсилювач

ВВН – вимірювач відношення напруг

ПНЧ – перетворювач напруга-частота

ТР – трансформатор

П – перемикач

КЛ – ключ

ТНП – трансформатор нульової послідовності

УТН - універсальний трансформатор напруги

ЕОМ – електронна обчислювальна машина

ВСТУП

Надійність сучасних систем виробництва та розподілу електроенергії багато в чому визначається надійністю ізоляції електрообладнання. Аварійні пошкодження, часто супроводжуються руйнуванням обладнання, спричиняють перебої з електрикою і серйозні економічні пошкодження електромереж і споживачів. Особливо значними є втрати від збоїв високовольтного обладнання, яке має велику єдину потужність.

Великі запаси підвищення ефективності роботи високовольтного обладнання укладені при переході на технічне обслуговування для реальних потреб. При цьому потреба в обслуговуванні та ремонті визначається виходячи з фактичного стану обладнання.

Пробій ізоляції високовольтного обладнання може призвести до відмови важливого обладнання, а також до ураження людей електричним струмом, що і забезпечує актуальність покращення контролю ізоляції високовольтного обладнання.

Щоб підтримувати діелектричні властивості ізоляції, необхідно систематично виконувати профілактичні випробування, огляди, видаляти непридатну ізоляцію і замінити її.

На підприємствах широко застосовується випробування ізоляції підвищеною напругою. Цей метод є найбільш ефективним для виявлення місцевих дефектів ізоляції і визначення її міцності, тобто здатності довгостроково витримувати робочу напругу. Електричні машини й апарати випробовують струмом промислової частоти, як правило, протягом 1 хв. Подальша дія струму може вплинути на якість ізоляції..

Запобіжні захисні засоби призначені для індивідуального захисту працюючого від світлових, теплових і механічних впливів, від продуктів горіння, від дії електричного поля, а також від падіння з висоти. До них належать: захисні окуляри, захисні каски, запобіжні монтерські пояси, страховочні канати, монтерські пазури, протигази, спеціальні рукавиці, а також

індивідуальні екрануючі комплекти і переносні екрануючі пристрої для захисту персоналу від впливу електричного поля в електроустановках надвисокої напруги промислової частоти.

РОЗДІЛ 1

ВИМІР ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

1.1. Основні методи контролю діелектричних характеристик ізоляції

Основні методи контролю діелектричних характеристик ізоляції при робочій напрузі на об'єкті засновані на вимірах струму, що протікає через ізоляцію під впливом фазної напруги мережі. Їх можна розділити на три групи. До першої групи належать методи прямого виміру контрольованої величини, до другої групи - методи порівняння між собою характеристик різних об'єктів даного розподільного пристрою (РУ). Методи третьої групи засновані на порівнянні вимірюваного значення з відомим, прийнятим в якості зразкового.

Прямим вимірюванням струму через ізоляцію можна визначити тільки модуль комплексної її провідності або (при малих втратах) її ємність. Повинна бути виміряні зміни контролюючого параметра, складову частки відсотка від його значення. Така точність прямого виміру недосяжна в експлуатаційних умовах. Якщо на вході вимірювального приладу попередньо зкомпенсувати струм, що протікає через нерухому ізоляцію даного об'єкта, то в подальшому буде виміряна тільки збільшення струму, пов'язане зміною діелектричних характеристик ізоляції.

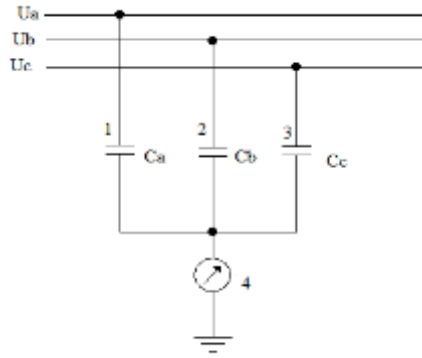


Рис. 1.1. Схема вимірювання діелектричних характеристик нерівно важким - компенсаційним методом

1, 2, 3 – об'єкти контролю; 4 – вимірювальний пристрій. УР – вказівник рівноваги; R3, R4; C4 – елемент плеча моста.

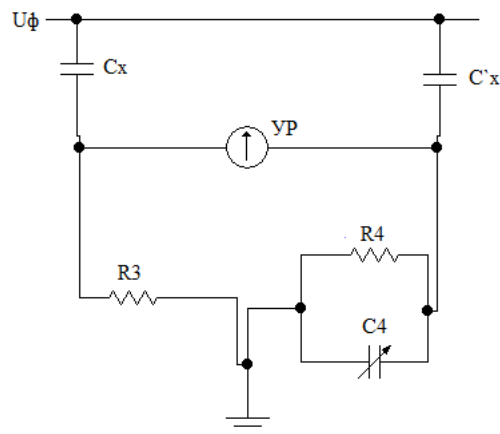


Рис. 1.2. Схема порівняння діелектричних характеристик двох об'єктів

Такий метод вимірювання, названий за аналогією з нерівноважним мостовим методом нерівно важкої - компенсації, не пред'являє високих вимог до точності вимірювального приладу і може бути використаний в умовах експлуатації. Одна з схем, яка реалізує цей метод [2,3], основана на вимірюванні суми трифазної системи струмів, протікаючи через ізоляцію трьох однотипних об'єктів (рис. 1.1). У припущенні малих різниць характеристик ізоляції в початковому стані трьох одночасно контрольованих

об'єктів можна вважати, що вимірюваний сумарний струм буде, близький до нуля. При збільшенні комплексної провідності ізоляції одного з цих об'єктів збільшуються струм через неї і відповідно змінюється сумарний струм; приріст цього струму можна виміряти будь-яким прямим методом.

Застосування такого методу вимірювання для експлуатаційного контролю ізоляції цілком допустимо, бо мізерно мала ймовірність дефектів ізоляції, які викликають одночасні і однакові зміни діалектичних характеристик всіх трьох об'єктів.

До методів другої групи відносять відповідне порівняння ємкості і $\operatorname{tg} \delta$ в однотипних об'єктів однозмінних фаз [4]. Порівняння відбувається за допомогою мостової схеми зазвичай мостом Шеренга (рис. 1.2). При цьому вимірюється різниця кутів діелектричних втрат об'єктів C_x і C'_x

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \operatorname{tg} (\delta - \delta') \approx \operatorname{tg} \delta - \operatorname{tg} \delta' \quad (1.1)$$

Якщо таким чином виміряти різницю втрат, кожен раз змінюючи один з об'єктів, то, вимірявши потім $\operatorname{tg} \delta$ будь-якого з них, можна вирахувати $\operatorname{tg} \delta$ ізоляції інших контролюючих об'єктів.

В якості об'єкта який використовується як зразкова міра, може бути обраний апарат з малими і стабільними втратами (наприклад, конденсатор зв'язку). Тоді значення $\operatorname{tg} \delta$ інших об'єктів, отримані шляхом порівняння вимірювання, будуть близькі до дійсних значень.

Значення ємкості виміряне за схемою на рис. 1.2:

$$C_x = C'_x * \frac{R_4}{R_3}. \quad (1.2)$$

Якщо об'єкт, обраний в якості зразкової міри C'_x , буде мати ємкість, що істотно перевищує ємкість контролюючого об'єкта, то необхідно використати шунт, який зменшує значення R_4 , або включити ємкість C'_x в плече R_3

До схем, які реалізують методи третьої групи, відносяться компенсаційна мостова і ват метрова. В якості зразковою величини – опорної напруги - використовується, як правило, напруга вторинної обмотки трансформатора напруги (ТН) тієї фази системи шин РУ, до якої приєднаний контролюючий об'єкт.

Слід уточнити, що методами цієї групи при використанні ТН також неможна здійснити вимірювання дійсного значення $\operatorname{tg} \delta$ ізоляції об'єкта, так як кутова похибка ТН, що використовується як зразкова, перевищує допустиму похибку визначення кута втрат. Тому вимірюване значення $\operatorname{tg} \delta$ буде мати велику систематичну похибку, для виключення якої необхідно внести поправку. Зазвичай ця поправка обчислюється як різниця значень $\operatorname{tg} \delta$, виміряних при робочій напрузі і напрузі 10 кВ під час наладки схеми вимірювання. Тому навіть при виключенні систематичної похибки дійне значення буде отримане лише в випадку, якщо виміряний при 10 кВ значення $\operatorname{tg} \delta$ співпадає зі значенням $\operatorname{tg} \delta$ при фазному напрузі. Оскільки при контролі ізоляції важливі лише зміни параметрів, вказане обмеження точності вимірів не має великого практичного значення.

Амплітудна похибка ТН зазвичай менше допустимої похибки вимірювання ємкості ізоляції. Тому методи третьої групи забезпечують вимірювання дійсної ємкості об'єкта.

Одна з перших схем, запропонованих для реалізації методів вимірювання $\operatorname{tg} \delta$ ізоляції при робочій напрузі, наведена на рис. 1.3.а. Опорна напруга U_0 подається з вторинної обмотки ТН, а трансформатор ТР служить для повороту фази напруги на 180° . Струм I_x , що протікає через ізоляцію об'єкта, компенсується струмом I_0 показової міри (ємкість C_0 і резистор R_0). При балансі струмів в схемі (сумарний струм, який протікає через вказівник рівноваги УР, $I = 0$)

$$C_x = C_0 \frac{U_0}{U_\phi}; \quad (1.3)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_0 R_0. \quad (1.4)$$

Сучасні схеми компенсації будуються з використанням операційних посилювачів. Одна з таких схем (рис. 1.3,б) – компенсатор напруги – складається з операційних посилювачів ОП, які використовуються в якості фазообертач, і показчика рівноваги ПР[5]. Джерелом опорної напруги є вторинна обмотка ТН. Конденсатор C_0 , включений у ланцюг зворотного зв'язку першого операційного посилювача, забезпечує поворот на 90° фази напруги, пропорційного струму I_x через ізоляцію об'єкта. Зсув фаз, відповідний куту δ втрат ізоляції об'єкта, створюється струмом через резистор R_0 . Другий операційний підсилювач забезпечує поворот фази напруги на 180° . Резистор R_1 забезпечує зрівнювання схеми по модулю, а резистор R_2 – по фазі.

Мостова схема з використанням ТН, як джерела опорної напруги (рис. 1.4.а) відрізняється від звичайної тим, що на плече порівняння подається низька напруга з вторинної обмотки трансформатора. Для забезпечення необхідної чутливості в якості зразкової ємкості C_0 слід використати конденсатор з ємкістю декількох тисяч піко фарад.

Схема ват метрової установки для вимірювань ПЗМ робочої напруги (рис. 1.4.б) практично не відрізняється від схем установок, які використовувалися при профілактичних випробуваннях [6]. Ланцюги напруги ватметра харчуються від ТН відповідної системи шин. Для компенсації систематичної похибки вимірювання $\tan \delta$, яка викликана кутовою похибкою ТН, можна в ланцюг напруги ватметра ввести фазо зсувний пристрій – резистор R , частина якого шунтується конденсатором C . Необхідний фазовий зсув забезпечується зміною ємкості конденсатора або опором резистора.

При контролі під робочою напругою принципово неможливо виключити з результатів вимірювання струми впливу. За рахунок цих струмів виміряне значення діалектичних характеристик може відрізнятися від дійсного; зміна струмів впливів, які виникли між двома вимірами може внести похибку в їх

результат. Значення похибки від струмів впливів і її стабільність мають бути встановлені в кожному конкретному випадку.

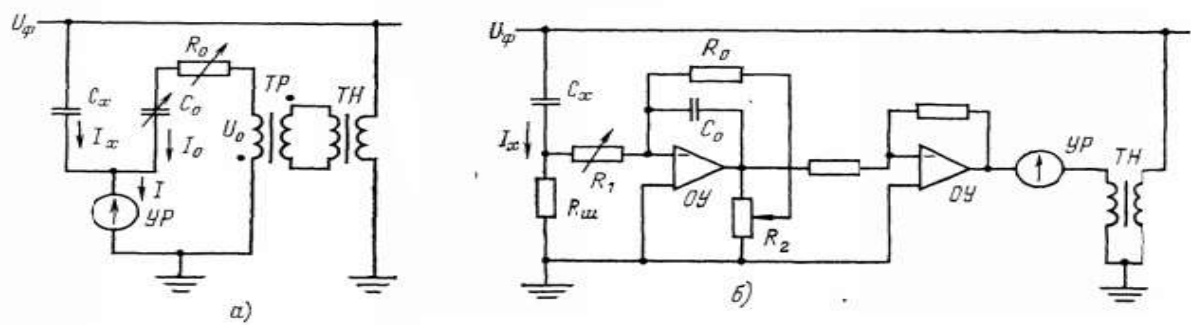


Рис. 1.3. Компенсаційні схеми вимірювання діелектричних характеристик: а- компенсація струмів; б – компенсація напруги

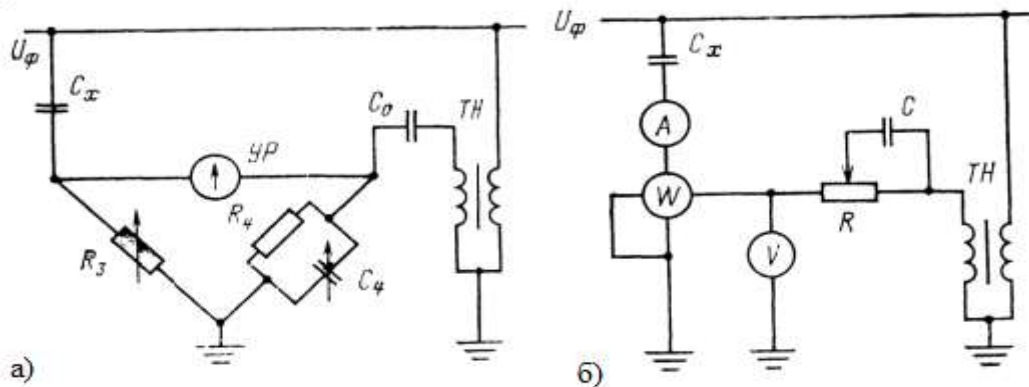


Рис. 1.4.а – мостова схема вимірювання діелектричних характеристик; б – ват метрова схема вимірювання діелектричних характеристик

Вимірювання діелектричних характеристик ізоляції під робочою напругою можливе тільки при прямій (нормальній) схемі вимірювальної установки. Тому в наслідок цього без конструкційних змін об'єкта здійснена організація такого контролю тільки в випадку наявності спеціальних вимірювальних приладів або виводів ПИН, а також якщо є ізоляція нижнього

фланця об'єкта від землі. Таким об'єктами являються води, трансформатори струму, конденсатори зв'язку.

1.2. Нерівноважний – компенсаційний метод

Схема вимірювання. Одним з найбільш простих методів реалізації способу контролю за зміною струму через ізоляцію є вимірювання суми трифазної системи струмів трьох аналогічних об'єктів.

У розрахунковій схемі, приведеній на рис. 1.5, провідності Y з відповідними індексами еквівалентні провідностям ізоляції контролюючих об'єктів 1-3, а провідність Y_B еквівалентні частковим ємкостям 4-6 цих об'єктів відносно ошиновки, сусідніх апаратів, а також інших елементів РУ.

Через вимірювальний орган 7 протікають струми промислових частот і вищих гармонік. Розглянемо їх окремо. Складовими промислової частоти в контролюючому струмі I_K є струм впливу $I_{вл}$, а також струм не симетрії $I_{нс}$, який викликаний різницею в провідності ізоляції об'єктів, які знаходяться в гарному стані (різність ємностей і $\text{tg } \delta$ ізоляції об'єктів при випуску їх з заводу).

Зі схеми (рис. 1.5) слідує:

$$I_{нс} = (Y_0 + \Delta Y_A)U_A + (Y_0 + \Delta Y_B)U_B + (Y_0 + \Delta Y_C)U_C, \quad (1.5)$$

де $\Delta Y = Y - Y_0$; Y_0 - середнє значення провідності ізоляції об'єктів.

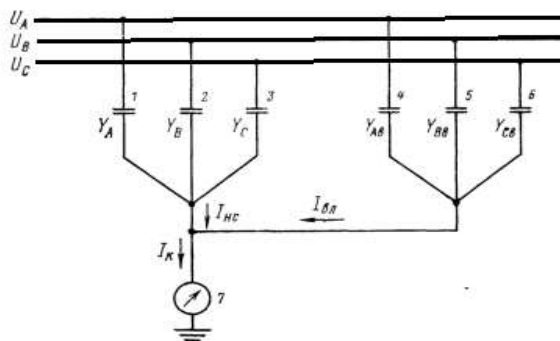


Рис. 1.5. До розрахунку схеми вимірювання нерівно важно -
компенсаційним методом

З урахуванням симетрії зірки фазних напруг

$$I_{\text{НС}} = \Delta Y_A U_A + \Delta Y_B U_B + \Delta Y_C U_C.$$

Для струму впливу аналогічно

$$I_{\text{ВЛ}} = \Delta Y_{AB} U_A + \Delta Y_{BB} U_B + \Delta Y_{CB} U_C.$$

При дефекті ізоляції струм не симетрії збільшується на величину ΔI і складає:

$$I_{\text{НС}} = I_{\text{НС}} + \Delta I.$$

Для виявлення наявності дефекту сумарний вимірюваний струм повинен перевищувати струм, викликаний не симетрією ємкостей об'єктів і впливами. Відношення модулів цих струмів (відношення сигнал / перешкода)

$$K_{\text{с.п}} = \frac{|I_{\text{НС}} + I_{\text{ВЛ}}|}{|I_{\text{НС}} + I_{\text{ВЛ}} + \Delta I|}. \quad (1.6)$$

З аналізу отриманих рівнянь слід, що виявлення дефекту залежить від співвідношення фаз струму, викликаного дефектом, і суми струмів симетрії і впливу. Розвиток дефекту може привести не тільки до збільшення, але і до зменшення вимірюваного струму, якщо ці струми знаходяться в протифазі.

Різниця в ємнісній провідності ізоляції однотипних об'єктів, що не мають дефектів, може досягати 5%; враховуючи струми впливу, дисбаланс може бути ще більше. Тому в найпростішою схемою вимірювання цим методом достовірно можна виявити тільки вже розвинене пошкодження ізоляції, змінивши її провідність більш ніж на 10-15%.

З (1.1) випливає, що забезпечення високої чутливості приладів для вимірювання розглянутим методом можливо тільки при зменшенні повного струму дисбалансу ($I_{\text{НС}} + I_{\text{ВЛ}}$). Найпростіший спосіб зменшити струм

дисбалансу - врівноважити вимірювану систему трифазного струму, для чого в вимірювальну ланцюг вводиться спеціальне балансувальне пристрій, що дозволяє змінювати коефіцієнт передачі струму кожного з об'єктів на вході вимірювальний пристрій.

В цьому випадку вимірюється струм, пропорційний струму об'єкта (наприклад, для фази А), буде:

$$I_{cA} = k_{cA}I_A, \quad (1.7)$$

де I_A - весь струм контролюючого об'єкта фази А; k_{cA} – коефіцієнт передачі симетруючого пристрою для фаза А.

Струм I_A включає в себе не тільки струм провідності ізоляції об'єкта даної фази, але і суму струмів впливу інших фаз і других об'єктів, які знаходяться під напругою. У загальному випадку

$$I_A = Y_A U_A + Y_{AA} U_A + Y_{BA} U_B + Y_{CA} U_C, \quad (1.8)$$

де U_A , U_B і U_C - відповідні фазні напруги; Y_A – провідність ізоляції об'єкта фази А; Y_{AA} , Y_{BA} і Y_{CA} - часткова провідність, за якими на об'єкт фази А протікають струми впливу з боку інших фаз групи та інших об'єктів, які знаходяться під напругою.

Аналогічні вирази визначають і струми інших фаз.

Просумувавши струми об'єктів всіх трьох фаз групи, отримаємо вираз для визначення вимірюваного сумарного струму

$$I_c = I_{cA} + I_{cB} + I_{cC}. \quad (1.9)$$

Згрупуємо в виразі (1.4) в одному доданку все струми впливу, визнані напругою однієї фази:

$$I_c = k_{cA} U_A (Y_A + Y_{Ab}) + k_{cB} U_B (Y_B + Y_{Bb}) + k_{cC} U_C (Y_C + Y_{Cb}), \quad (2.0)$$

де Y_{Ab} , Y_{Bb} , Y_{Cb} - сумарна провідність шляхів струмів впливів, які викликані відповідними фазними напругами.

Для виконання сформульованої вище умови-виключення струмів не симетрії і впливів - необхідно, щоб при гарному (початковому) стані ізоляції всіх трьох об'єктів групи струм I_c дорівнював нулю. Це забезпечується при умові

$$k_{cA}U_A(Y_A + Y_{Ab}) = k_{cB}U_B(Y_B + Y_{Bb}) = k_{cC}U_C(Y_C + Y_{Cb}). \quad (2.1)$$

Регульованим елементом схеми є симетричний пристрій, зміни коефіцієнтів переді k_C якого і виконується симетрування зірки вимірювальних струмів фаз. Зазвичай симетруючий пристрій об'єднується з сумуючим в один наділ, який являється первинним вимірювальним перетворювачем вимірювального пристрою. Застосовуються резистор і трансформаторні перетворювачі.

Симетрування в схемі рис. 1.6, а відбувається шляхом перерозподілення струму об'єкта (кожної фази) між сумуючими резисторами r_0 і шунта ми $R_A - R_C$, для чого змінюються опори резисторів $r_A - r_B$.

В схемі рис 1.6,б симетрується падіння напруги від струмів на резисторах r_0 і $r_A - r_C$.

В трансформаторних перетворювачах (рис.1.7) додаються магнітні потоки. Маючи трансформатор з великим числом відпайок (рис.1.7,а) і вибираючи число витків зворотно пропорційно струму I через ізоляцію, можна добитися приблизної рівності намагнічуючих сил сумуючих струмів об'єктів i , отже зменшення струму небалансу. Реально таке регулювання можливе з точністю 1,5 – 2 %, що на порядок гірше потрібного. Плавна зміна намагнічування сили може отримати за допомогою резисторів r_A-r_C (рис.1.7, б), змінюючи ними співвідношення струмів протікаючи відповідно по всім виткам обмотки n_1 або тільки по їх частинам n_2 . Можлива компенсація струмів небалансу струмом від трансформатора напруги(рис. 1.7, в)

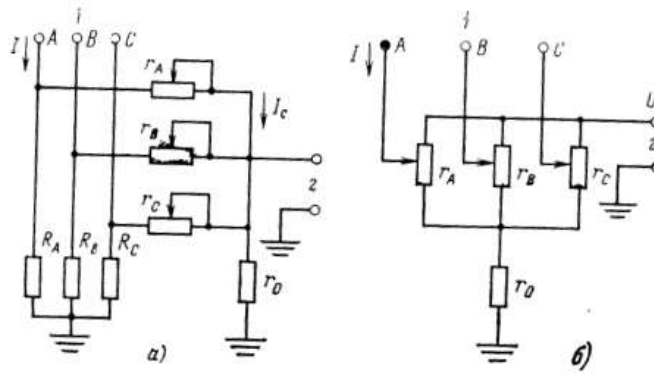


Рис. 1.6 . Схеми резисторних вимірювальних перетворювачів

а - до об'єктів вимірювання; б- до вимірювального приладу.

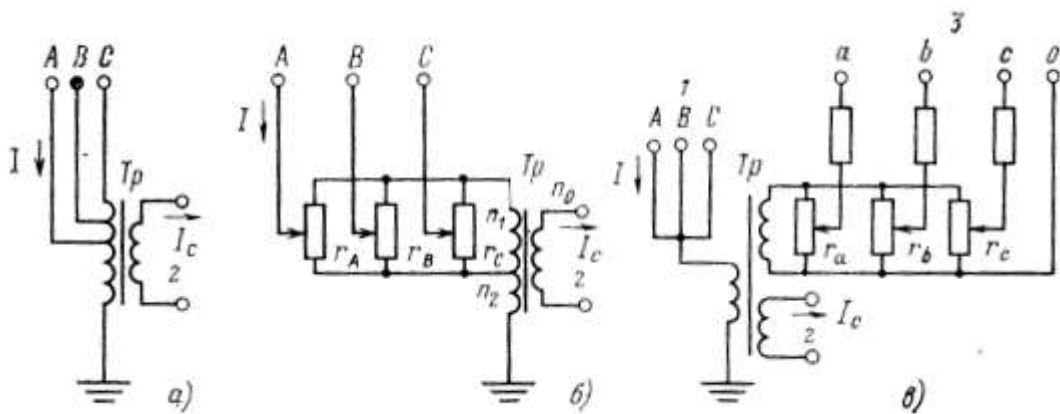


Рис. 1.7. Схеми трансформаторних вимірювальних перетворювача

а - до об'єктів вимірювання; б - до вимірювального приладу; в - до ТН.

Розглянемо вплив перешкод від вищих гармонійних складових у вимірюваному струмі. Основне значення мають струми третьої гармоніки, проте може зрости вплив і вищих гармонік.

За умови виконання вимоги про компенсацію струмів не симетрії і впливів чутливість методу буде визначати еквівалентний сумарний струм

перешкод від вищих гармонік I_{Γ} . За аналогією з (1.1) відношення сигнал перешкода

$$K_{с.в} = \frac{|\Delta I|}{|I_{\Gamma}|} = \frac{\Delta Y_{д} |I_0|}{Y_0 |I_{\Gamma}|} = Y_{д} \frac{|I_0|}{|I_{\Gamma}|}, \quad (2.2)$$

де $I_0 = Y_0 U_{\Phi}$ - струм через ізоляцію об'єкта; $\gamma_{д}$ - відносна зміна провідності ізоляції, викликана дефектом; U_{Φ} - фазна напруга мережі.

За результатами ряду вимірювань значення I_{Γ}/I_0 може досягати 15%. Тому без придушення (фільтрації) перешкод контроль ізоляції розглянутим методом неможливий. Необхідний коефіцієнт фільтрації, що забезпечує виявлення дефекту з найменшою відносною величиною $\gamma_{дmin}$:

$$k_{\Phi} = \frac{K_{с.п} |I_{\Gamma}|}{Y_{дmin} |I_0|}. \quad (2.3)$$

При допустимій похибці вимірювання, що відповідає $\gamma_{д} = 1 \cdot 10^{-3}$ і $K_{с.п} = 2$, необхідний коефіцієнт фільтрації $k_{\Phi} > 300$ (50 дБ).

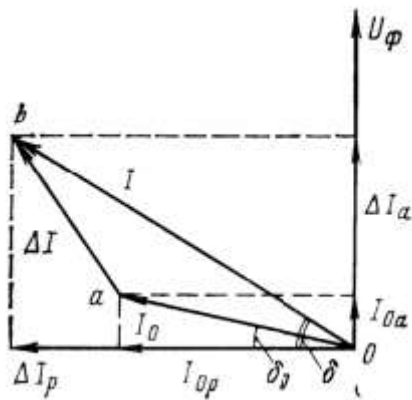


Рис. 1.8. Векторна діаграма струму через ізоляцію об'єкта

Таким чином, пристрій для вимірювань розглянутим методом повинно складатися з трьох основних вузлів: симетруючого пристрою для усунення струму небалансу, суматора струмів і селективного вимірювача.

Після компенсації струму небалансу і придушення перешкод від вищих гармонік струм на виході суматора ΔI_C буде пропорційний зміні провідності ізоляції об'єкта ΔY_D і розглянутий пристрій може бути використано для контролю ізоляції за цим параметром:

$$\Delta I_C = k_C \Delta Y_D U_{\Phi 0}.$$

Висновок про пропорційність ΔI_C і ΔY_D справедливий лише при постійній напрузі мережі. Якщо ця напруга в момент вимірювання буде відрізнятися від номінальної, прийнятої для розрахунку, то в отримані дані буде внесена відносна похибка, що дорівнює відносній зміні напруги. Однак при контролі ізоляції така похибка цілком допустима.

На рис. 1.8 представлена векторна діаграма струму через ізоляцію одного з контрольованих об'єктів. Вектор I_0 (точка а) характеризує стан ізоляції в момент симетрування схеми (компенсація струмів при початковому стані ізоляції; прийнято, що $k_C = 1$). Вектор I (точка б) характеризує стан ізоляції після зміни контрольованих параметрів. На виході суматора вимірюється струм ΔI , що відповідає цій зміні. Можуть бути виміряні як складові вектора ΔI (активна ΔI_a і реактивна ΔI_p), так і його модуль.

З векторної діаграми слідує зв'язок між вимірюваним струмом ΔI і діелектричними характеристиками ізоляції об'єкта:

зміна ємності

$$\frac{\Delta C}{C_0} = \frac{\Delta I_p}{I_{0p}}; \quad (2.4)$$

діелектричні втрати в початковому стані

$$tg \delta_0 = \frac{I_{0a}}{I_{0p}}; \quad (2.5)$$

діелектричні втрати після зміни стану ізоляції

$$tg \delta = \frac{\Delta I_a + I_{0a}}{\Delta I_p + I_{0p}}; \quad (2.6)$$

зміна діелектричних втрат

$$\Delta tg\delta = tg\delta - tg\delta_0; \quad (2.7)$$

після перетворень з отриманих співвідношень слід:

$$\Delta I_p = \frac{\Delta C}{C_0} I_{0p}; \quad (2.8)$$

$$\Delta I_a = k I_{0p} \Delta tg\delta, \quad (2.9)$$

де

$$k = \frac{\Delta C}{C_0} \left(1 + \frac{tg\delta_0}{\Delta tg\delta} \right) + 1.$$

Для випадку роздільного вимірювання активної та реактивної складових вектора ΔI (з урахуванням того, що $\frac{I_{0p}}{I_0} = \cos\delta_0$) отримуємо:

$$\frac{\Delta I_a}{I_0} = k \cos\delta_0 \Delta tg\delta; \quad (3.0)$$

$$\frac{\Delta I_p}{I_0} = \frac{\Delta C}{C_0} \cos\delta_0. \quad (3.1)$$

Коефіцієнт $k > 1$ свідчить про більш високу чутливості до дефектів методу вимірювання струму в порівнянні з методом вимірювання $tg\delta$. Однак в реальних умовах можна прийняти, що $k = 1$ s $\cos\delta_0=1$, отже:

$$\frac{\Delta I_a}{I_0} \approx \Delta tg\delta; \quad \frac{\Delta I_p}{I_0} \approx \frac{\Delta C}{C_0} \quad (3.1)$$

При вимірі модуля струму ΔI

$$\frac{\Delta I}{I_0} = \frac{[\Delta I_a^2 + \Delta I_p^2]}{I_0} \approx \left[(\Delta t g \delta)^2 + \left(\frac{\Delta C}{C_0} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

При вимірі модуля збільшення струму одночасно проводиться контроль за зміною ємності та діелектричних втрат ізоляції. При вимірі окремо реактивної і активної складових струму ΔI кожен із зазначених параметрів контролюється незалежно.

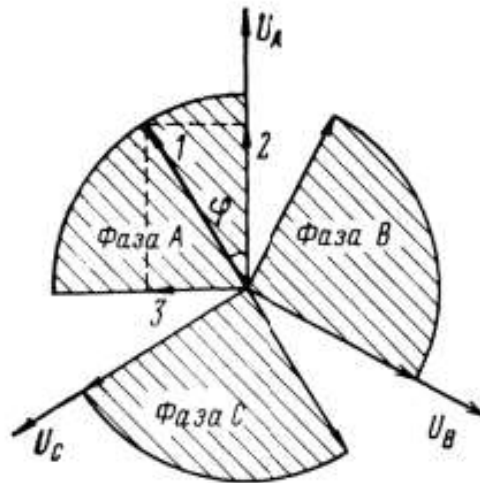


Рис. 1.9 Годограф векторного струму небалансу ΔI :

$$1 - \Delta I/I_0 = \gamma_d; 2 - \Delta I_a/I_0 = \operatorname{tg} \delta; 3 - \Delta I_p/I_0 = \Delta C/C_0$$

На рис. 1.9 приведена векторна діаграма, яка пояснює можливість контролю зазначеними методами. Відрізки кіл, що обмежують заштриховані сектори, є годограф вектора ΔI при пошкодженнях ізоляції об'єктів фаз А, В і С (при одному і тому ж відносному зміні провідності γ_d).

Проводячи вимірювання фазочутливих приладів векторметром, можна отримати відомості про те, який об'єкт (фаза) має дефект, а також про характер і ступінь розвитку ушкодження (зміна б або ємності ізоляції об'єкта).

Похибки вимірювання. Точність вимірювання нерівно важно - компенсаційним методом визначається не тільки величиною залишкового

струму не симетрії $I_{нс}$, викликаного небалансом схеми через неточності симетрування, а і його стабільністю.

Слід зазначити одну цікаву особливість розглянутої схеми. Одночасні зміни одно званих величин у всіх трьох фазах до розбалансування схеми не призведуть; так, наприклад, дія зміни напруги мережі (при відсутності не симетрії), однакових температурних змін ємностей об'єктів різних фаз або елементів схеми симетруючого пристрою. Подібні зміни викликають лише незначні зміни значення залишкового струму не симетрії і чутливості пристрою.

Розглянемо залежність від дестабілізуючих чинників складової струму I_c одного з об'єктів. З (1.5) випливає, що максимальне відносне зміна I_c

$$\frac{\Delta I_c}{I_c} = \frac{\Delta k_c}{k_c} + \frac{\Delta U_\phi}{U_\phi} + \frac{\Delta Y}{Y_0 + Y_B} + \frac{\Delta Y_B}{Y_0 + Y_B}. \quad (3.2)$$

Відносне зміна коефіцієнта передачі симетруючого пристрою $\Delta k_c/k_c$ визначає стабільність вимірювальної схеми; позначимо його $\gamma_{сх}$.

Значення $\Delta U_\phi/U_\phi$ визначається зміною ступеня не симетрії фазного напруги. Зазвичай цією величиною нехтують. Однак розглядаються дуже малі зміни, і тому врахуємо її коефіцієнтом γ_n .

Величина ΔY_B в даному випадку визначається зміною струму впливів у часі (через відключення сусідніх осередків, зміни інтенсивності корони і т. п.), З огляду на, що $\Delta Y_B \ll Y_0$, отримуємо:

$$\frac{\Delta Y_B}{Y_0 + Y_B} \approx \frac{\Delta Y_B}{Y_0} = \gamma_B.$$

Величина ΔY_B містить дві складові: зміна провідності ізоляції об'єкта, пов'язане з наявністю дефекту (АКД) і викликане зовнішніми чинниками (ДКП). Зміна провідності може бути викликано зміною паразитних струмів через відмінності в ступені забруднення або зволоження поверхонь об'єктів контрольованої групи, різними температурними змінами їх параметрів і аналогічними явищами, які слід віднести до зовнішніх перешкод.

Оскільки $Y_B \ll Y_0$, то

$$\frac{\Delta Y}{Y_0 + Y_B} \approx \frac{\Delta Y}{Y_0} = \frac{\Delta Y_D + \Delta Y_{\Pi}}{Y_0} = \gamma_D + \gamma_{\Pi}. \quad (3.3)$$

Таким чином, струм, що з'явився на виході суматора після симетрування схеми, може бути викликаний як розвитком дефекту ізоляції в одному з об'єктів, так і зовнішніми факторами: зміною симетрії фазної напруги, зміною струму впливів і іншими перешкодами.

З урахуванням введених позначень цей струм

$$\Delta I_C = \gamma_D I_C + (\gamma_{Cx} + \gamma_B + \gamma_H + \gamma_{\Pi}) I_C. \quad (3.4)$$

Підлягає контролю лише перша складова цього струму ($\gamma_D I_C$), інші складові визначають сумарний струм перешкод ($\gamma_{п.с.} I_C$).

Значення γ_{Cx} можна звести до мізерно малому конструктивними заходами. Значення коефіцієнтів γ_H і γ_B , пов'язані з впливом зовнішніх факторів, а також випадкова складова похибки пристрою, що вимірює струм ΔI_C , визначають сумарну випадкову похибку вимірювання розглядаються методом і, отже, поріг чутливості: найменша зміна характеристик ізоляції γ_D , виявляється в даних умовах.

Зниження цього порогу можна домогтися шляхом вибору оптимальних умов для вимірювань або відповідної обробкою результатів вимірювань. Проводячи періодичні вимірювання завжди при одній і тій же схемі комутації РУ в суху погоду і при близьких температурах, можна істотно знизити вплив несприятливих зовнішніх факторів. Не симетрія фазних напруг мережі - досить рідкісне явище. Тому повторні вимірювання, а також порівняння результатів, отриманих на різних об'єктах РУ, дозволять виключити погрішність і від цього фактора.

Для радикального ж усунення похибки від не симетрії напруги найпростішу схему (рис. 1.1) необхідно дещо ускладнити: вимірювальний прилад слід включити по диференціальній схемі. Тоді вимірювана їм величина

- різниця струмів ΔI_c двох груп однотипних об'єктів - не буде залежати від не симетрії фазних напруг

$$\Delta I_c = \Delta I_{c1} - \Delta I_{c2} = (\gamma_{д1} - \gamma_{д2} + \gamma_{в1} - \gamma_{в2} + \gamma_{п1} - \gamma_{п2}) I_c. \quad (3.5)$$

Така схема дозволяє одним приладом одночасно контролювати шість об'єктів, що особливо зручно, наприклад, при контролі введів автотрансформаторів.

Розглянуті похибки відносяться до класу випадкових явищ. Тому проводячи при автоматичному контролі статистичну обробку результатів вимірювань, можна виявити зміни контрольованого параметра навіть при порівняно високому рівні перешкод.

Наведемо дані, отримані при експериментальній перевірці методу. При вимірах визначалося еквівалентну зміна провідності γ , викликане як зміною характеристик ізоляції, так і перешкодами. На рис. 1.10 представлено розподіл більше 250 значень γ вимірюваних протягом року при контролі трьох введів 330 кВ одного автотрансформатора

Розподіл побудовано на ймовірнісній папері зі шкалою нормального закону розподілу. Експериментальні точки на графіках знаходяться досить близько до прямих; це свідчить про те, що закон розподілу досвідчених даних близький до нормального.

На рис. 1.10 наведені значення γ , отримані до зміни схеми комутації РУ (пряма 1) і після переобладнання підстанції - створення схеми чотирикутника (пряма 2). Симетрування схеми вимірювань після переобладнання підстанції повторно не проводилося.

В якості запобіжного зміни показань, викликаного зміною струму впливів, слід прийняти різницю середніх значень у розподілів $\gamma_B = \gamma_{2cp} - \gamma_{1cp} = 1,2 * 10^{-3}$.

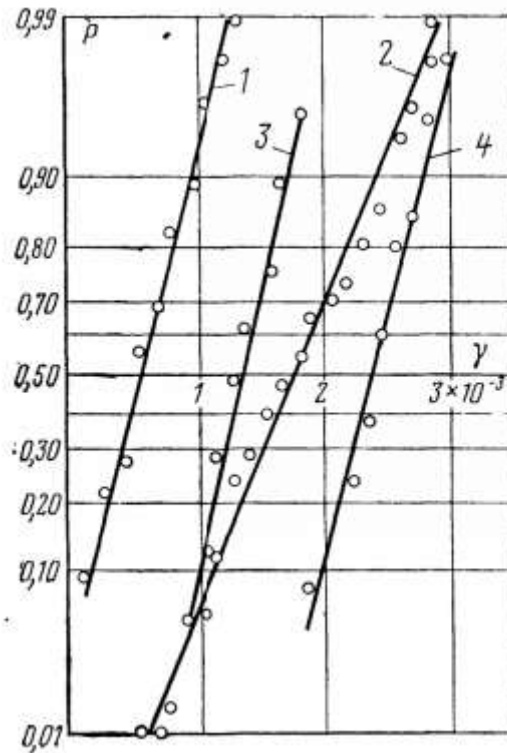


Рис. 1.10. Розподілення результатів виміру

Незворотні зміни характеристик контрольованих об'єктів або схеми вимірювань можуть бути виявлені шляхом аналізу зміни середніх значень γ в часі. Якщо розглянути порівняно невеликий інтервал часу, протягом якого мало ймовірно істотне погіршення ізоляції об'єктів, то отримані дані будуть характеризувати стабільність схеми вимірювань $\gamma_{с.х.}$

Порівняння середніх значень результатів вимірювань, отриманих з інтервалом в 2 міс, при інших однакових умовах дало значення $\gamma_{с.х.} = 5 \cdot 10^{-4}$. Це свідчить про стабільність схеми симетрування та ефективності прийнятих конструктивних заходів.

Оцінка температурної залежності результатів вимірювань може бути отримана по кореляції між значенням γ і температурою верхніх шарів масла автотрансформатора. У перші 2 міс дослідної експлуатації ця залежність була знехтувана малою ($\Delta\gamma = 2,5 \cdot 10^{-4}$ на 10°C); за наступні 8 міс спостереження вона збільшилася приблизно в 2 рази. Цією залежністю, мабуть, можна пояснити і деяке відхилення експериментальних точок від прямої 2 на рис. 1.10. Розподілу результатів вимірювань, проведених при практично однакових

температурах (прямі 3 і 4), вказують на те, що інші фактори (перешкоди) визначили сукупність показань приладу, близьку до нормально розподіленої випадкової величини.

Хоча профілактичні випробування істотних змін характеристик ізоляції вводів не виявили, можна припустити, що зазначена невелика температурна залежність результатів вимірювань пов'язана з деяким розходженням температурних залежностей $\text{tg}\delta$ вводів через погіршення стану масла в одному з них; $\text{tg}\delta$ масла в цьому введенні майже в 2 рази перевищував $\text{tg}\delta$ масла в інших вводах.

За даними рис. 1.10 випадкова складова загальної похибки вимірювання характеризується середнім квадратичним відхиленням $s = 3 \cdot 10^{-4}$. Поріг чутливості методу в розглянутому прикладі: $\gamma_{\text{п.с}} = 2,33s = 7,0 \cdot 10^{-4}$. Бракувальна норма в даному випадку визначається значенням $\Delta\gamma_{\text{д}} = \Delta \text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-2}$, тому вимоги до точності вимірювань, виконуються.

Для оцінки можливостей безперервного контролю були оброблені результати автоматичних вимірювань, проведених на одній групі вводів 330 кВ автотрансформатора і трьох групах трансформаторів струму типу ТРН-330, встановлених в РУ потужної станції.

Реєстрація даних велася близько 500 годин протягом 2 міс. Був обраний період нестійкої погоди з чергуванням заморозків і відлиг. Суха морозна погода спостерігалася 58% часу, а сира погода з туманами і мокрим снігом - 42%. Для кожного об'єкта вибірка містила близько 1000 значень γ , отриманих з інтервалом 30 хв. До вибірки включені всі отримані дані, незалежно від електричної схеми РУ, яка змінювалася відповідно до експлуатаційної необхідності. Розподіл результатів вимірювань також виявилося досить близьким до нормального. При контролі вводів середньоквадратичне відхилення $s = 1 \cdot 10^{-3}$. Це більш ніж в 3 рази перевищує значення s , певне при періодичному контролі. При вимірах на ТТ $s = 2 \cdot 10^{-3}$.

Уставка сигналізатора (норма бракування) при безперервному контролі з сигналізацією перед аварійного стану повинна вибиратися з

урахуванням забезпечення дуже малої ймовірності помилкового сигналу. Прогноз максимальних значень сумарного рівня перешкод $\gamma_{п.с}$, заснований лише на теоретичній кривій нормального розподілу, через короткочасність досвіду може мати недостатню достовірність. Більш точний прогноз про найбільше значення $\gamma_{п.с}$ при заданій ймовірності можна отримати, побудувавши розподіл крайніх членів вибірки, наприклад, найбільших за 1 добу.

Результати розрахунку цим способом ймовірності помилкових сигналів при контролі трансформаторів струму в залежності від уставок сигналізатора γ_c наведені нижче:

Таблиця 1.1

Результати ймовірності помилкових сигналів

γ_c	$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$
Ймовірність помилкового сигналу	0,2	0,02	0,001
Кількість помилкових сигналів	9	0,9	0,045

При розрахунку використовувалися дані вимірювань в погану погоду (при дощах, туманах, відлизі), бо лише в цих випадках спостерігався високий рівень перешкод. У місцевості, де проводився експеримент, середня тривалість опадів в рік не перевищує 12,5% часу. З урахуванням цього і визначено кількість хибних сигналів (всі сигнали протягом однієї доби розглядалися як один помилковий сигнал).

Уставка, що забезпечує досить мале число помилкових сигналів ($\gamma_c = 1,5 \cdot 10^{-2}$), перевищує бракувальний норматив по $\text{tg} \delta$. Тому можливість вибору уставки, що виключає помилкові сигнали, в даному випадку відсутній.

Основний шлях зниження ймовірності помилкових сигналів - автоматична обробка результатів вимірювань. До неї відносяться обчислення середнього значення параметра за певний період і швидкості його зміни, а також визначення корегувальних залежностей (від температури, між результатами вимірювань на різних групах однотипних апаратів і т. п.)

З (1.6) випливає, що зниження рівня перешкод можна отримати, включивши вимірювальний пристрій з диференціальної схемою - на різницю струмів двох груп однотипних об'єктів. В даному випадку цей спосіб дозволив знизити рівень перешкод більш ніж в 3 рази, що практично виключило можливість помилкових сигналів.

Інтенсивні перешкоди виникають, як правило, при поганій погоді. Тому можливий і інший шлях виключення помилкових сигналів-блокування пристрою під час дощу, відлиги і т. п.

1.3. Ватметровий метод

Схема вимірювання ватметра (рис. 2.17) складається з ватметра, амперметра і вольтметра. Значення вимірюваних параметрів визначаються показаннями цих пристроїв за формулами

$$\text{tg } \delta \approx \cos \varphi = \frac{P}{U_0 I_x} \quad \text{и} \quad C_x = \frac{I_x}{\omega U},$$

Де P - показання ватметра; I_x - струм через об'єкт вимірювання; U_0 - напруга, доведено до ватметра. У $\delta < 15$ градусів ($\text{tg } \delta < 0,25$), $\cos \varphi$ і $\text{tg } \delta$ відповідають достатній точності. Під великими кутами значення $\text{tg } \delta$ визначається вимірюванням $\cos \varphi$ використанням таблиць тригонометрії.

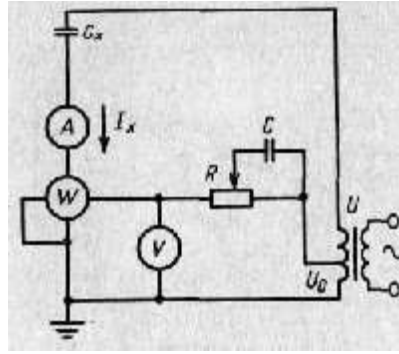


Рис. 1.11. Схема ватметрової установки

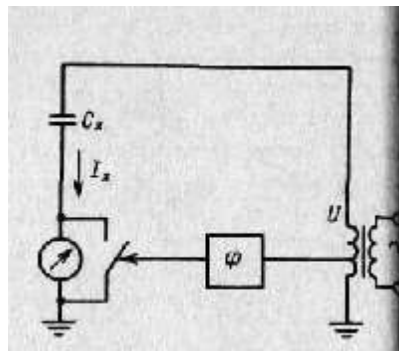


рис. 1.12. Структурна схема векторметра

Спеціальні ватметри використовуються для вимірювань в ланцюгах з невеликими φ (так звані малокосинусні ватметри). При будівництві ватметрової контуру особливу увагу слід приділити на звивистих ланцюгах напруги ватметра, оскільки вони можуть бути джерелом значних помилок вимірювання.

Схема установки ват-метра (1.12.) в якій ланцюги напруги живиться від спеціального вимірювального тестового трансформатора, забезпечує найбільшу точність вимірювань, так як вимірювання автоматично підтримує консистенцію напруги і ватметра для перевірки напруги, а крім того, фази цих стресів мало відрізняються один від одного. Трансформатор напруги, первинна обмотка якого підключена до об'єкта, також може використовуватися як джерело напруги для ватметра. Помилка коефіцієнта

перетворення цього трансформатора призводить до помилки в вимірюванні ємності об'єкта. Помилка фази в результаті зсуву фаз між напругою, нанесеною на об'єкт, і струмом, що тече через обмотування напруги ватметра, викликає похибку в вимірі кута втрати.

Для усунення фазових помилок установка ват-метра може оснащуватися компенсуючим пристроєм, який усуває фазові зрушення. Компенсуючий пристрій виконується, наприклад, у вигляді конденсатора, обхідної частини або всього додаткового опору намотування напруги ватметра. Під час контролю конденсатора зразка можна зробити компенсацію фази сівби. Компенсуючий ємність (або обхідна частина додаткової стійкості ватметра) підбирається при такому розрахунку, що відхилення ватометра було нульовим.

Векторметр - це пристрій, який вимірює компонент поточного вектора, який знаходиться в фазі з контролем напруги. пристрій працює за принципом синхронного випрямлення: вимірюваний струм випрямляється спеціальною схемою ключа, керованою напругою однакової частоти (Рис. 2.18). Якщо синхронний випрямляч контролюється напругою в фазі напруги на об'єкті, показання приладу, що вимірює середній струм, будуть пропорційні активному компоненту струму через об'єкт: $I_x \cos \varphi$. Коли фаза контролю напруги зміщується на 90 градусів відносно напруги на об'єкті, показання приладу будуть відповідати реактивному компоненту: $I_a \sin \varphi$.

Співвідношення цих значень і є томе дотичності кута діелектричної втрати ізоляції: $I_a / I_p \approx \tan \varphi \tan \delta$. При вимірюванні реактивного компонента струму показання приладу будуть пропорційні ємності об'єкта.

1.4. Мостовий метод

Схема вимірювань. Схема моста (рис. 2.11) складається з керованого об'єкта з параметрами S_x і $\tan \delta$ (плече Z_1), зразкового конденсатора C_0 (плече Z_2) і балансових ланцюгів. Вимірювальний елемент схеми (основний

перетворювач), через який тече струм об'єкта, є плечем R_3 . Міст можна використовувати в прямих, перевернутих і зворотних контурах. На прямій схемі заземлено точку 2 моста; в перевернутій схемі - точка 1, а на зворотному - точка 3.

Схему зворотного включення іноді називають заземленою діагоналлю. Особливість схеми в питанні полягає в тому, що опір плечей 1 і 2 в багато разів перевищує опір плечей 3 і 4. Тому при достатній точності для практичних цілей можна вважати, що струми в плечах 3 і 4 залежать тільки від параметрів об'єкта і зразкового конденсатора. Доречно розглянути процес балансування мосту, припустивши, що опір рівноважного індексу високий і потенційна різниця між точками 3 і 4 схеми визначається тільки параметрами плечей моста і моста.

Поточний I_0 конденсатора моделі, який не має втрат, випереджає застосовану напругу U рівно на 90 градусів (Рис. 2.12). Струм I_x випереджає напругу меншим кутом. Відмінність фаз цих кипів полягає в куту δ , дотичність якого повинна бути визначена. Балансування мосту полягає в зміні параметрів плечей 3 і 4 з метою створення рівного рівня напруги, що падає на них. На початку балансування C_4 і $0'$ на плечі, 4 так само, як поточна фаза I_0 (рис. 2.12, і, пункт А).

Змінюючи значення R_3 і тим самим змінюючи напругу U_3 за модулем, вони досягають мінімального значення в діагоналі $U_4 - U_3$ (точка b). Очевидно, це буде той випадок, коли вектор U_4 стане перпендикулярним вектором U_3 . На другому етапі балансування, змінюючи значення C_4 , вони змінюють фазу напруги U_4 на мінімальне значення напруги в діагоналі. При цьому кінець вектора U_4 буде рухатися по кривій змінного струму. Другий етап процесу балансування закінчиться збігом фаз напруги U_4 і U_3 . При цьому напруга по

діагоналі дорівнює UD' . Залишається, знову змінюючи R_3 , щоб зменшити його до нуля

Рис. 1.13. Схема моста Шеринга

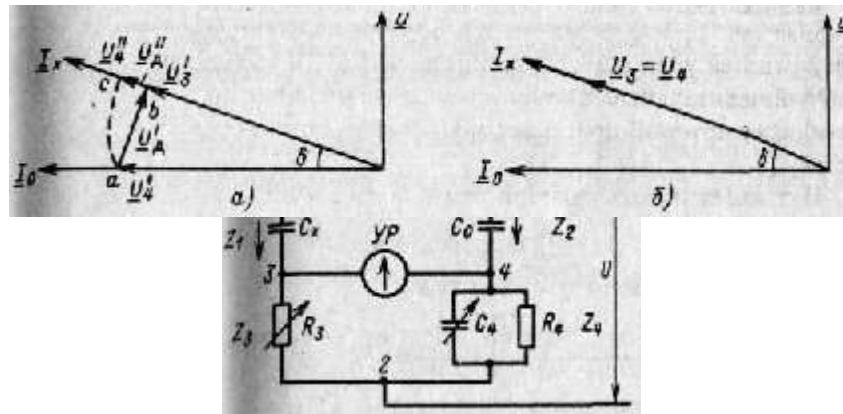


Рис. 1.14. Векторні графіки струмів і стресів в схемі моста: А- процес балансування моста; б-киди і штами збалансованого моста

Зазвичай опір рівноважного індексу невеликий і струм, що проходить по діагоналі, трохи змінює потенціали точок 3 і 4 моста. Крім того, початкові цикли балансування здійснюються при низькій чутливості показчика. Тому повне балансування моста потребуватиме ще кількох циклів, послідовно наближаючи міст до рівноваги.

Коли міст рівноважний, стан зустрічається з умовою $Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$. Схема, про який йде мова, визначає параметри схеми заміщення послідовних об'єктів, тому

$$Z_1 = r + \frac{1}{j\omega C_x}, \text{ а } \text{tg } \delta = \omega r C_x$$

Параметри інших плечей мосту:

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_0}; \quad Z_3 = R_3; \quad Z_4 = \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4}$$

Розмістивши дані в рівноважному рівнянні мосту і виділивши актуальні і уявні частини, ми отримаємо

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4; \quad (2.5) \quad C_x = C_0 R_0 / R_3$$

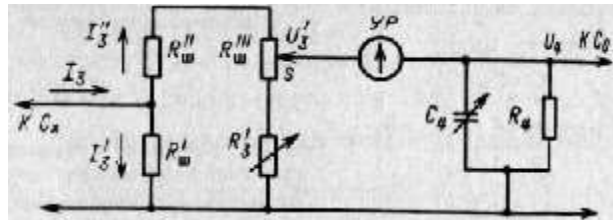


Рис. 2.13. Схема включення шунта плеча Z_3 мосту

Для спрощення обчислень опір R_4 вибирається на рівні $10 n/\pi$, де n – це ціле число. Потім, на промисловій частоті $2 \pi f$, 100π і $\operatorname{tg} \delta$, $10n^2 C_4$. Якщо значення C_4 виражається в мікрофарадах, значення вимірюваного $\operatorname{tg} \delta$ буде визначатися наступними коефіцієнтами

$$R_4, \text{ Ом } 100/\pi \quad 1000/\pi \quad 10 \, 000/\pi \quad \operatorname{tg} \delta \, 0,01 \, C_4 \quad 0,1 \, C_4 \, C_4$$

$$\operatorname{tg} \delta, \% \, C_4 \quad 10 \, C_4 \quad 100 \, C_4$$

Для розширення лімітів вимірювання потужності в плече мосту вставляється обхід (рис. 2.13). Частина шунту R'_{sh} входить в поточний ланцюжок об'єкта. Інша частина шунту разом з резистором R'_3 створює розподільник напруги, який балансує схему (зміна напруги U_3). Плавне балансування забезпечується реохордом R , частина якого входить в плече R_3 .

Від рівних штабів плечей

\underline{U}'_3 и \underline{U}'_4 , слiдує

$$\left. \begin{aligned} C_x &= C_0 \frac{R_4}{R'_{ш}} \left(\frac{R_{ш}^{-s}}{R_3} + 1 \right); \\ \operatorname{tg} \delta &= \omega R_4 C_4 - \omega R_4 C_0 \left(\frac{R_{ш}^{-s} - R'_{ш}}{R_3} \right), \end{aligned} \right\}$$

де $R_{ш} = R'_{ш} + R''_{ш} + R'''_{ш} - s$, а $R_3 = R'_3 + s$.

Оскільки $C_4 \ll C_0$ і, як правило, $R_3 > R_5$, з достатньою точністю до практики, це можливо, і якщо є шунт для розрахунку $\operatorname{tg} \delta$ за формулою (2.5). Опір шунту $R'_{ш}$ обраний таким, що балансування мосту здійснювалося не менше трьох десятиліть магазину опору R_3 . Якщо є втручання (струм впливів) можуть бути випадки, коли струм ІО відстає у фазі струму, що тече по плечу мосту і є сумою поточного ІХ і поточного впливу. У цих випадках конденсатор C_4 повинен бути включений паралельно резистору R_3 для вимірювання так званого негативного $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора. У той же час,

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \operatorname{tg} \delta = - \omega C_4 R_3.$$

Якщо шкала C_4 моста знову нав'яжеться у значеннях тангенсного кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta_{шк}$, то

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \operatorname{tg} \delta_{шк} \frac{R_3}{R_4} = - \operatorname{tg} \delta_{шк} \frac{C_0}{C_x}$$

при включеному шунті плеча \underline{Z}_3 моста

$$\operatorname{tg} \delta_{(-)} = - \omega C_4 R_3 \frac{R_{ш}^{-s}}{R_3 + R_{ш}^{-s}} \approx - \omega C_4 R_3 \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_3}$$

Чутливість схеми мосту визначає найнижчі виявлені значення змін вимірюваних параметрів.

$$\Delta \operatorname{tg} \delta = \omega R_4 \Delta C_4; \quad \frac{\Delta \operatorname{tg} \delta}{\operatorname{tg} \delta} = \frac{\Delta C_4}{C_4} \text{ и } \frac{\Delta C_x}{C_x} = \frac{\Delta R_3}{R_3}$$

$$\Delta \operatorname{tg} \delta \approx \frac{\Delta U_{II}}{U_4} = \frac{\Delta U_{II}}{U} \frac{1}{\omega C_1 R_4}$$

Ці співвідношення вказують на досить простий спосіб визначити чутливість мосту при вимірюванні. Для цього, після балансування схеми, слід по черзі змінювати значення C_4 і R_3 , поки не буде чітких показань індексу рівноваги.

Отримане значення ΔC_4 та ΔR_3 визначають реальну чутливість. Якщо рівноважний показчик має нечутливість, що ускладнює балансування схеми, то за допомогою цього методу можна визначити, що точності вимірювання достатньо, а не для досягнення рівноваги моста при найбільшій чутливості показчика.

При розгляді процесу балансування було прийнято, що в момент рівноваги схеми напруга УДО в діагоналі моста дорівнює нулю. Реальні показники рівноваги мають обмежену чутливість, тобто ϵ . Завжди існує така напруга ΔU_D або струм ΔI_D , яку не можна виявити приладом (напруга або поточна нечутливість рівноважного індексу). В случае небаланса по фазе (рис. 2.14, а) (2.10)

При небалансі по напрузі (рис. 1.14, б)

$$\Delta R_3 = \frac{\Delta U_{II}}{I_3} \approx \frac{\Delta U_{II}}{U} \frac{1}{\omega C_x}$$

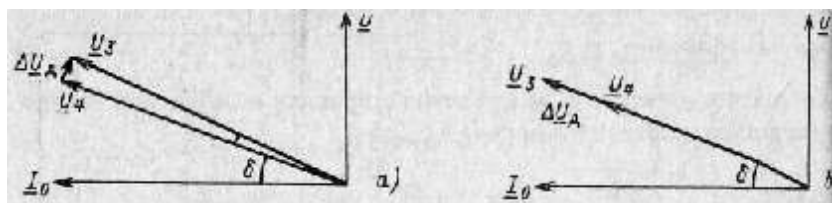


Рис. 2.14. До розрахунку помилок через нечутливість рівноважного індексу: а - міст не збалансований поетапно; б - міст не збалансований напругою

Помилка у визначенні R_3 призведе до помилки обчислення C_X . З $\Delta C_X / C_X \approx \Delta R_3 / R_3$, потім (2,11)

$$\frac{\Delta C_X}{C_X} = \frac{\Delta U_D}{U} \frac{1}{\omega C_X R_3} = \frac{\Delta U_D}{U} \frac{i}{\omega C_0 R_4}$$

Порівняння (2.10) і (2.11) показують, що $\Delta \text{tg } \delta \approx \Delta C_X / C_X$, тобто абсолютна похибка визначення $\text{tg } \delta$ дорівнює відносній помилці визначення C_X . Як правило, рівноважні покажчики мають низький вхідний опір і раціональну нечутливість струму ΔI_D . Напруженість дисбалансу

$$\Delta U_D = \Delta I_D (Z_3 + Z_4 + Z_D) \approx \Delta I_D (R_3 + R_4 + R_D),$$

де R_D — є опором рівноваги індексу

формула визначення похибки вимірювань найме форму

$$\Delta \text{tg } \delta = \frac{\Delta C_X}{C_X} = \frac{\Delta I_D}{I} \frac{R_3 + R_4 + R_D}{\omega C_0 R_4}$$

Для того, щоб чутливість мосту мало змінююся при зміні R_4 , необхідно мати $R_4 \gg R$. Це, як правило, так. Це дозволяє змінювати ваги $\text{tg } \delta$, змінюючи значення R_4 .

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАНЬ

2.1. Методи негативного зворотного зв'язку

На рис. 2.1 приведена структурна схема, що ілюструє даний метод, де *СИ* — основний засіб вимірювань; *ОП* - зворотний перетворювач. Зворотній перетворювач перетворює вихідну величину y в величину $x_{o.c}$, фізично однорідну з вимірюваною величиною x . При негативному зворотньому зв'язку на вході *СИ* утворюється різниця $x - x_{o.c}$. Припустимо, що *СИ* і *ОП* мають лінійні функції перетворення

$$y = kx; \quad x_{o.c} = \beta y, \quad (3.7)$$

де k і β — коефіцієнти перетворення (чутливості) *СИ* і *ОП* відповідно.

Очевидно, що введення негативної зворотної призвело до зменшення коефіцієнта перетворення (чутливості) в $1 + \beta k$ раз. При використанні глибокого зворотного зв'язку ($\beta k \gg 1$) отримаємо $k_{o.c} \approx 1/\beta$, тобто коефіцієнт передачі $k_{o.c}$ визначається тільки коефіцієнтом передачі *ОП*.

Тоді при включенні негативного зворотного зв'язку отримаємо функцію перетворення

$$y = k_{o.c}x, \quad (3.8)$$

де $k_{o.c} = k / (1 + \beta k)$ — коефіцієнт перетворення зі зворотним зв'язком.

Оцінимо похибку, викликану нестабільністю параметрів k і β . З (2.2) отримаємо:

$$\Delta y = \frac{\partial y}{\partial k} \Delta k + \frac{\partial y}{\partial \beta} \Delta \beta = \frac{x}{(1 + \beta k)^2} \Delta k - \frac{k^2 x}{(1 + \beta k)^2} \Delta \beta \quad (3.9)$$

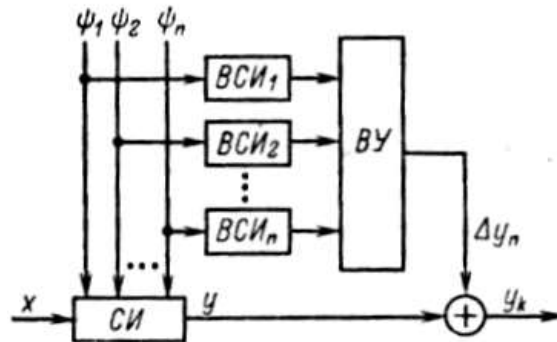
або, переходячи до відносних похибок:

$$\delta_y = 1 \cdot \delta_k / (1 + \beta k) - \beta k \delta_\beta / (1 + \beta k) \quad (4.0)$$

де

$$\delta_y = \Delta y / y; \quad \delta_k = \Delta k / k; \quad \delta_\beta = \Delta \beta / \beta.$$

Похибки δ_k и δ_β являють собою відносні мультиплікативні похибки *СИ* і *ОП* відповідно. З (2.4) випливає, що введення негативного зворотного зв'язку зменшує вихідну мультиплікативну похибку в $1 + \beta k$ раз, однак при цьому додається похибка, створювана *ОП*. При $\beta k \gg 1$ отримуємо $\delta_y \approx \delta_\beta$, тобто



мультиплікативна похибка визначається практичною похибкою *ОП*. Отже, даний метод доцільний в тому випадку, коли *ОП* істотно точніше *СИ*.

Рис. 2.2. Структурна схема СИ з корекцією похибки методом допоміжних вимірювань

Застосування негативного зворотного зв'язку дає зменшити похибку нелінійності. Необхідно відзначити, що збільшення глибини зворотного зв'язку призводить до зміни динамічних властивостей замкнутої системи: погіршується якість перехідних процесів, знижується запас стійкості.

Неважко помітити, що зворотний зв'язок зменшує абсолютну аддитивну похибка на виході *СИ* в $1 + \beta k$ раз, проте в стільки ж разів зменшується і значення вихідної величини y , а, отже, відносна адитивна похибка не змінюється.

Даний метод знаходить широке застосування при вимірах електричних величин (напруги; струмів), де створення точних зворотних перетворювачів не викликає труднощів.

2.2. Основні методи зменшення похибок

Загальний метод, в принципі відповідний для зменшення помилок, - це конструкторсько-технологічний метод, заснований на виявленні причин і джерел найбільш значних помилок і всебічному зниженні їх впливу. У конструктивно-технологічному методі використовуються такі методи, як термостатирование, використання малошумних електронних компонентів, використання прецизійних елементів і компонентів, матеріалів зі стабільними характеристиками, раціональний дизайн і передові технології виробництва вимірювальних приладів.

Поведінка систематичних і випадкових помилок в часі (при повторних вимірах) істотно розрізняється, в зв'язку з чим суттєво різняться методи їх зменшення.

Однак можливості цього методу досить обмежені і, що дуже важливо, його застосування для досягнення високої точності вимірювань призводить до різкого подорожчання засобів вимірювань. У зв'язку з цим методи підвищення точності засновані на введенні структурної і (або) тимчасової надмірності, тобто впровадженні додаткових засобів вимірювальної техніки (вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади) і (або) проведення додаткових вимірювань, результати яких є обробляється спеціальним алгоритмом, що підвищує точність

Залежно від типу застосовуваних перетворень розрізняють лінійну і нелінійну фільтрацію, а практична реалізація необхідних перетворень може здійснюватися як апаратно, так і програмно.

При постійному значенні вимірюваної величини найбільш ефективним методом зменшення випадкової помилки є усереднення результатів

спостережень. Стандартне відхилення помилки результату вимірювання, т. Е Середнє значення результатів спостереження, зменшується до \sqrt{n} раз.

Слід зазначити, що для реалізації оптимальної процедури фільтрації необхідна апріорна інформація про характеристики досліджуваного сигналу і перешкоди (випадкову помилку). Для більш детального вивчення фільтрації слід звернутися до спеціальної літератури.

Набагато складніше зменшити випадкову помилку, коли значення вимірюваної величини змінюється з плином часу. У цьому випадку використовується більш складна процедура фільтрації, мета якої - отримати оптимальну оцінку вимірюваного значення, і оцінка також розглядається як процес, що відбувається в часі. Помилка оцінки (різниця між оцінкою і вимірюваним процесом) є функцією часу, і в якості критерію оптимальності оцінки використовуйте деякі функції з помилки оцінки на інтервалі часу спостереження, наприклад, середній квадрат помилка.

Розглянемо основні методи зменшення систематичних помилок. Як відомо, систематичні помилки діляться на постійні і змінні. Найбільш поширені методи виключення (компенсації) постійних систематичних помилок виправлень, заміни, компенсації помилок у знаку.

Однак на практиці, особливо при використанні інформаційних і вимірювальних систем для вимірювання неелектричних величин в виробничих умовах, домінуючу роль відіграють змінні систематичні помилки, викликані змінами температури, вологості, тиску навколишнього середовища, змінами напруги харчування, зовнішніх електричних і магнітних полів і ін. Слід зазначити, що змінні систематичних помилок залежать від змінних зовнішніх впливів, значення яких зазвичай невідомі і тому проявляються як випадкові функції часу. У цьому сенсі вони відрізняються від випадкових помилок тим, що представляють собою нестационарні випадкові функції, які відносно повільно змінюються в часі. Зниження таких змінних систематичних помилок - актуальна і досить складна задача.

Перераховані вище методи усунення систематичних помилок використовуються в основному в лабораторній практиці - їх використання в автоматичних вимірювальних приладах і ІВС в виробничих умовах і при зміні систематичних помилок в більшості випадків неможливо.

Зазначені вище методи виключення систематичних похибок знаходять застосування головним чином в лабораторній практиці - їх застосування в автоматичних вимірювальних приладах і ІВС в виробничих умовах і при змінах систематичних похибок в більшості випадків неможливо.

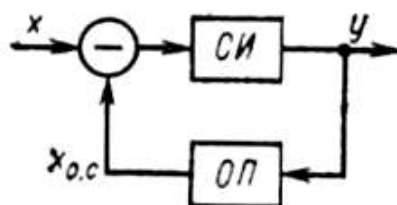


Рис. 2.1. Структурна схема СИ з негативним зворотнім зв'язком

У зв'язку з цим отримали розвиток методи зменшення змінних систематичних похибок, засновані на використанні структурної і (або) тимчасової надмірності.

2.3. Методи допоміжних вимірювань.

Ідея методу ілюструється на рис. 2.2, де СИ - основний засіб вимірювань; ВСИ₁, ВСИ₂, ..., ВСИ_n — допоміжні засоби вимірювань; ВУ - обчислювальний пристрій.

Припустімо, що похибка СИ викликається впливом зовнішніх факторів $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$, причому залежність цієї похибки від значень зовнішніх факторів відома:

$$\Delta y = F(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n).$$

Метод допоміжних вимірювань застосуємо для зниження впливу тих дестабілізуючих факторів, які можуть бути легко враховані. Крім того, для здійснення корекції похибки необхідно знати залежність похибки *СИ* від цих чинників. Недоліком методу допоміжних вимірювань є також те, що для зниження впливу кожного фактора потрібен окремий допоміжний засіб вимірювань. Зазначені недоліки суттєво звужують область практичного використання даного методу.

В даному випадку здійснюється корекція похибки *СИ* шляхом використання значень кожного з факторів ψ_i , отриманих за допомогою *ВСИ*₁, *ВСИ*₂, ..., *ВСИ*_{*n*}. За цими значеннями обчислювальний пристрій обчислює значення поправки Δu_n , необхідної для корекції похибки, по (2.5).

Замість введення поправки вихідна величина *ВУ* може бути використана для управління параметрами *СИ* (самоналаштування).

Фактично метод допоміжних вимірювань являє собою один з варіантів реалізації принципу багатоканальності, що дозволяє забезпечити інваріантність вихідної величини системи до тих чи інших збурюючих впливів.

2.4. Методи зразкових мір

Вони засновані на визначенні в процесі циклу вимірювань реальних значень параметрів функцій перетворення *СИ* шляхом відключення від входу *СИ* вимірюваної величини і підключення зразкових мір.

У загальному випадку функція перетворення *СИ* з достатньою точністю описується поліномом порядку $n-1$:

$$y = \sum_{i=1}^n d_i x^{i-1},$$

причому всі похибки *СИ* визначаються змінами параметрів d_i .

Процес вимірювання складається з $n+1$ тактів. В першому такті вимірюють величину x . Потім вимірювану величину x відключають і в наступних тактах до входу *СИ* по черзі підключають заходи M_1, M_2, \dots, M_n , результати y_1, y_2, \dots, y_n , вимірювання значень яких спільно з результатом y_0 першого тактового вимірювання утворюють систему рівнянь

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= \sum_{i=1}^n d_i x^{i-1}; \\ y_1 &= \sum_{i=1}^n d_i M_1^{i-1}; \\ &\dots \dots \dots \\ y_n &= \sum_{i=1}^n d_i M_n^{i-1}. \end{aligned} \right\}$$

Останні n рівнянь системи дозволяють обчислити всі параметри d_1, d_2, \dots, d_n , функції перетворення *СИ*. Підставляючи знайдені їх значення в перше рівняння, знаходимо з нього значення вимірюваної величини.

У разі лінійності функції перетворення *СИ* отримаємо систему трьох рівнянь з трьома невідомими d_1, d_2, x , рішення якої щодо x має вигляд

$$x = M_1 + (M_2 - M_1) (y_0 - y_1) / (y_2 - y_1).$$

Якщо нульове значення x входить в діапазон вимірювань, то одна з зразкових мір може мати нульове значення ($M_1 = 0$). При лінійній функції перетворення *СИ*, результати вимірювання $M_1 = 0$ и M_2 можуть бути використані для автоматичної зміни параметрів функції перетворення (самоналаштування).

При нелінійній функції перетворення *СИ* може бути використано кусково її опис. Наприклад, при кусочно-лінійному представленні функції перетворення *СИ* зв'язок між вихідний і вхідний величинами виражається залежністю

$$y = d_{1j} + d_{2j}x, \quad j = 1, 2, \dots, m,$$

де m — кількість лінійних ділянок, якими може бути з необхідною точністю апроксимована функція перетворення $СИ$. У цьому випадку цикл вимірювань складається також з трьох

тактів, а значення вимірюваної величини обчислюється за формулою

$$x = M_t + (M_{t+1} - M_t) (y_0 - y_1) / (y_2 - y_1).$$

Методи зразкових мір дозволяють зменшити всі складові систематичної помилки $СИ$ (адитивна, мультиплікативна, помилка нелінійності) незалежно від причин їх виникнення.

Зразкові міри M_t і M_{t+1} вибираються з набору заходів не довільно, а в залежності від результату першого виміру годин, який проілюстрований на рис. 2.4. Очевидно, для цього потрібно $m + 1$ зразкових мір.

Недоліком методу зразкових заходів є необхідність періодично відключати вимірюється значення від входу SI і підключати приблизні заходи, а також велика кількість зразкових заходів зі значною функцією перетворення SI .

Реальна сфера застосування цих методів - це область вимірювання електричних величин, оскільки при вимірюванні неелектричних величин виникають труднощі зі створенням набору заходів, однорідних з виміряним значенням; крім того, не завжди можливо відключити вимірювану неелектричну величину від входу вимірювального обладнання.

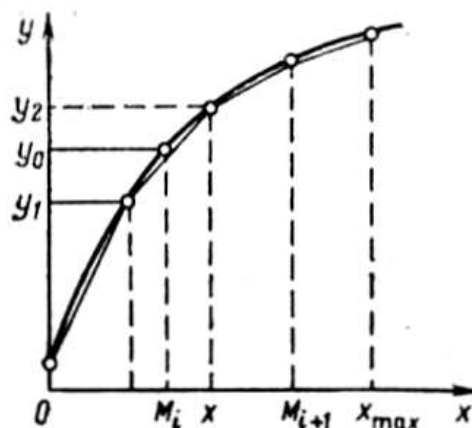


Рис.2.4. функція перетворення $СИ$

2.5. Ітераційні методи.

Ітераційний метод - це математичний спосіб вирішення проблеми, який генерує послідовність наближень. Цей метод використовується як для лінійних, так і для нелінійних задач з великою кількістю змінних. Слово «Ітераційний» або «Ітераційний» відноситься до методики, яка вирішує будь-яку проблему лінійної системи з послідовним наближенням на кожному етапі.

Крім основних засобів вимірювання SI, існує точний зворотний перетворювач OP і обчислювальний пристрій VU. Процес виправлення помилок наступний. Спочатку виміряне значення x подається на вхід SI (перемикач P знаходиться в положенні 1), а відповідне значення вихідного значення y_0 зберігається в VU. Потім значення y_0 подається на вхід OP, а вихід OP підключається до входу SI (перемикач P знаходиться в положенні 2).

Особливість ітераційних методів полягає в тому, що в процесі виправлення помилок результат вказується кілька разів, і кожен наступний результат заснований на попередньому. Таким чином, результат вимірювання виходить шляхом послідовних наближень. Залежно від операцій, що використовуються в процесі корекції (додавання-віднімання або множення-ділення), існують адитивні і мультиплікативні ітераційні алгоритми корекції.

Ітераційний алгоритм підвищення точності може бути реалізований або шляхом почергового виконання необхідних операцій (тимчасове поділ), або шляхом майже одночасного виконання операцій за допомогою додаткових функціональних блоків, об'єднаних в відповідну структуру (просторове

розділення операцій). Як приклад розглянемо ітераційний алгоритм адитивної корекції з тимчасовим поділом операцій, який ілюструється на рис. 2.3.

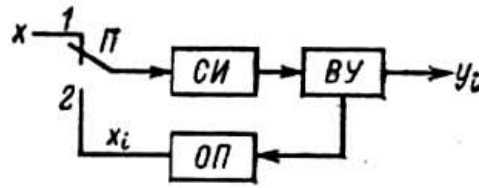


Рис. 2.3. Структурна схема СИ з ітераційною корекцією похибки

Далі y_1 подають на вхід точного зворотного перетворювача, вимірюють величину x_1 на його виході, отримуючи результат y'_1 , обчислюють другу поправку $\Delta y_2 = y_1 - y'_1$ другий скоригований результат $y_2 = y_0 - \Delta y_2$. При необхідності описаний циклічний процес корекції повторюють до досягнення необхідної точності.

При цьому вихідна величина СИ приймає значення y_0 , а ВУ обчислює першу поправку $\Delta y_1 = y_0 - y'_0$. Потім обчислюється перший скоригований результат $y_1 = y_0 - \Delta y_1$. На цьому закінчується перший цикл ітераційної корекції.

Припустимо, що СИ має функцію перетворення, де k — номінальний коефіцієнт перетворення; δ — відносна мультиплікативна похибка; Δ — абсолютна адитивна похибка.

$$y = k(1 + \delta)x + \Delta,$$

Точний зворотний перетворювач повинен мати функцію перетворення

$$x_i = y_i/k.$$

Тоді результат вимірювань після виконання n циклів корекції запишеться у вигляді

$$y_n = k[1 + (-1)^n \delta^{n+1}]x + (-1)^n \delta^n \Delta.$$

Очевидно, якщо $|\delta| < 1$, то при збільшенні числа n ітераційних циклів відбувається зменшення абсолютного значення як адитивних, так і мультиплікативних помилок, і помилки зменшуються тим швидше, чим менше δ . Отже, цей алгоритм корекції більш ефективний для *СИ*, де переважає адитивна помилка.

У разі, коли *SI* має значні адитивні і мультиплікативні помилки, може виявитися доцільним використовувати комбінований мультиплікативний ітераційний метод виправлення помилок.

Алгоритми мультиплікативної ітеративної корекції відрізняються тим, що замість обчислення адитивної корекції в кожному циклі обчислюється поправочний коефіцієнт. Виявляється, мультиплікативні алгоритми більш ефективні для *SI*, де переважає мультиплікативна помилка.

Перевага ітераційних методів полягає в тому, що з їх допомогою виправляється загальна помилка *СІ* незалежно від причин, що її викликають.

Очевидним недоліком цих методів є необхідність використання досить точного інверсного перетворювача, що обмежує область їх практичного використання в основному виміром електричних величин. Ітераційні алгоритми з просторовим розділенням операцій використовуються для створення точних вимірювальних підсилювачів.

2.6. Тестові методи

Сутність тестових методів підвищення точності полягає в тому, що в процесі циклу вимірювань отримують інформацію НЕ тільки про значення вимірюваної величини, але і про параметри функції перетворення *СІ* в момент вимірювання.

На відміну від методів зразкових мір в тестових методах при додаткових вимірах використовуються тести, формуються за участю вимірюваної

величини. Це дозволяє, по-перше, не відключати вимірювань величину від входу СІ, по-друге, використовувати мале число зразкових величин навіть при істотній нелінійності функції перетворення СІ.

У загальному випадку функція перетворення СІ описується поліномом порядку $n-1$ (2.12), який містить n параметрів d_i . Цикл вимірювань складається з $n + 1$ тактів: в першому такті вимірюється величина x , а в n інших тактах - тести $A_1(x), A_2(x), \dots, A_n(x)$, кожен з яких є деякою функцією вимірюваної величини x

Результати вимірювань утворюють систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= \sum_{i=1}^n d_i x^{i-1}; \\ y_1 &= \sum_{i=1}^n d_i [A_1(x)]^{i-1}; \\ &\dots \dots \dots \\ y_n &= \sum_{i=1}^n d_i [A_n(x)]^{i-1}. \end{aligned} \right\}$$

Складність рішення системи рівнянь (2.12) істотно залежить від порядку полінома і виду використовуваних тестів $A_j(x)$. Використовувані в практиці тести можна розділити на три групи: адитивні, мультиплікативні і функціональні.

Вирішивши систему рівнянь (2.12), отримаємо значення параметрів d_1, d_2, \dots, d_n і шукане значення x .

Адитивні тести формуються у вигляді суми

$$A_j(x) = x + \theta_j,$$

де θ_j — зразкова величина, фізично однорідна з вимірюваною.

Мультиплікативні тести формуються у вигляді добутку

$$A_j(x) = k_j x,$$

де k_i — відомий коефіцієнт перетворення.

Очевидно, що адитивні і мультиплікативні тести являють собою окремі випадки функціональних тестів, в яких $A_j(x)$ являє собою довільну відому функцію. Функціональні тести використовуються порівняно рідко і головним чином при вимірах електричних величин.

З практичної точки зору важливим є питання про можливість використання тільки адитивних або тільки мультиплікативних тестів. Доведено, що, використовуючи тільки мультиплікативні тести, можна визначити всі параметри рівнянь d_i функції перетворення, так як при цьому система рівнянь (2.14) має нескінченно багато рішень.

Найбільш широке застосування знайшли адитивні і мультиплікативні тести, які легко реалізуються як для електричних, так і для неелектричних величин.

Тільки адитивні тести дозволяють вирішити поставлену задачу лише в тому окремому випадку, коли хоча б один з параметрів d_i функції перетворення СИ дорівнює нулю, наприклад, для функції перетворення виду

$$x = d_1 + d_2 x^2.$$

У загальному випадку (все $d_i \neq 0$) необхідно застосовувати як адитивні, так і мультиплікативні тести, причому значення x буде обчислюватися найбільш просто в тому випадку, коли використовується один тест одного виду, а інші $n-1$ тестів - іншого.

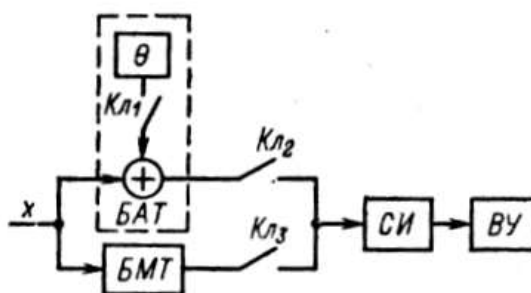


Рис. 2.5. Структурна схема СИ з корекцією похибки тестовим методом

Крім кошти вимірів *СИ* і обчислювального пристрою *ВУ*, структурна схема включає в себе блок формування адитивної тесту *БАТ*, блок формування мультиплікативного тесту *БМТ* і комутуючі ключі *Кл1*, *Кл2*, *Кл3*.

Як приклад розглянемо використання кусочно-лінійної апроксимації функції перетворення *СИ*. В цьому випадку необхідно формування двох тестів: адитивного і мультиплікативного. Відповідна структурна схема наведена на рис. 2.5.

Процес вимірювання складається з трьох тактів. У першому ключі *Кл1* і *Кл3* розімкнуті, а ключ *Кл2* замкнений і на вхід *СИ* подається безпосередньо вимірювана величина x . У другому такті замикається *Кл1* і на вхід *СИ* подається адитивний тест $x + \theta$. У третьому такті ключ *Кл2* розмикається, а *Кл3* замикається, при цьому на вхід *СИ* подається мультиплікативний тест kx .

Результати тактових вимірів запишемо у вигляді системи

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= d_{1j} + d_{2j} x; \\ y_1 &= d_{1j} + d_{2j} (x + \theta); \\ y_2 &= d_{1j} + d_{2j} kx. \end{aligned} \right\}$$

Вирішивши систему (1.26) відносно x , отримаємо

$$x = \theta (y_2 - y_0) / (k - 1) (y_1 - y_0).$$

Обчислювальний пристрій запам'ятовує значення y_0, y_1, y_2 і обчислює значення x по (2.16). Так як обчислене значення x не залежить від параметрів d_{1j}, d_{2j} функції перетворення *СИ* на j -ій ділянці апроксимації, то можна зробити висновок про те, що виключаються адитивна і мультиплікативна похибки і суттєво зменшується похибка нелінійності *СИ*.

Отримання результатів тактових вимірювань відповідно до (2.15) ілюструється на рис. 2.6.

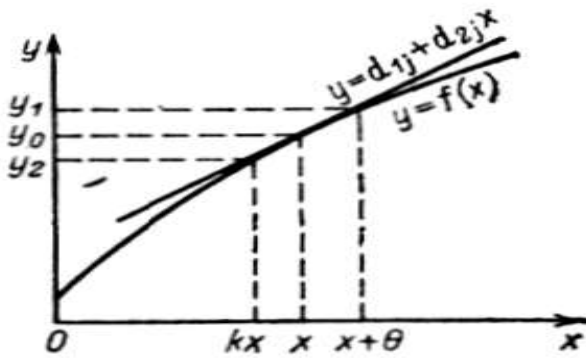


Рис. 2.6. Функція перетворення СИ

Функція перетворення $y = f(x)$ апроксимується кусково-лінійно, і будь-який j -й інтервал апроксимації не має фіксованих обмежень, але визначається інтервалом, на якому розташовані значення x , $x + \Theta$, kx . Коли значення x змінюється і константи Θ і k змінюються, все три точки одночасно зміщуються в секцію нового наближення. У зв'язку з цим, незважаючи на нелінійність функції перетворення, потрібні тільки дві точні величини: Θ і k .

На рис. 2.7 представлена блок-схема, на якій виключено вплив коефіцієнта перетворення ВМТ на результат вимірювання. Це досягається тим, що вхід ВМТ з'єднаний з виходом ВАТ, і вводиться ще одне додаткове вимірювання.

Якщо отримання точного і стабільного значення Θ зазвичай не викликає особливих труднощів, то створення ВМТ зі стабільним коефіцієнтом перерахунку k не завжди можливо.

$$y_3 = d_{1j} + d_{2j}k(x + \theta).$$

Процес вимірювання складається з чотирьох циклів. Перші три заходи повністю аналогічні заходам схеми, показаної на рис. 2.7. У четвертому стовпці, коли ключ $K12$ відкритий, ключі $K11$ і $K1Z$ закриті; на вхід СІ подається тест виду $k(x + \theta)$. Результат цього виміру запишеться у вигляді

$$x = \theta(y_2 - y_0) / [(y_3 - y_1) - (y_2 - y_0)].$$

Вирішивши спільно (2.16) і (2.17), отримаємо:

Як видно з (2.18), результат вимірів не залежить від коефіцієнта k перетворення *БМТ*.

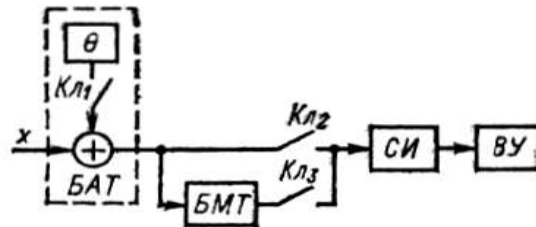


Рис. 2.7. Структурна схема СИ з корекцією похибки тестовим методом

Мале число тестів і відсутність необхідності відключення вимірюваної величини від входу *СИ* дозволяють використовувати тестові методи для підвищення точності вимірювання як електричних, так і неелектричних величин.

При значній нелінійності функції перетворення *СИ* для досягнення високої точності вимірювання може знадобитися використання кусочно-параболічної апроксимації функції перетворення. В цьому випадку необхідно сформулювати ще один тест і провести ще один вимір годин. Таким чином, в більшості практичних випадків методи тестування вимагають формування невеликої кількості тестів (2-3) і, як наслідок, використання невеликої кількості вибірових значень.

В даний час методи випробувань знайшли практичне застосування при вимірюванні таких фізичних величин, як напруга, струм, електричне опір, ємність, індуктивність, зміщення, маса, витрата рідких і сипучих матеріалів, температура, сила, електропровідність розчинів, товщина покриття, Теплопровідність матеріалів.

РОЗДІЛ 3

ВИМІРЮЮЧИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ОПОРУ ІЗОЛЯЦІЇ ДЛЯ УСТАНОВОК, ЯКІ ЗНАХОДЯТЬСЯ ПІД НАПРУГОЮ

3.1. Вимірюючий перетворювач

Схеми на випрямлених струмах контролюючої мережі і стороннього джерела є одними з найефективнішими для реалізації пристрою виміру опору ізоляції, які знаходяться під напругою. Робочі характеристики схем на випрямлених струмах є більш високими. Можна виділити схеми, що використовують постійну ЕРС, на рис. 3.1.а зображено реалізацію одного з варіантів.

Струм через вимірювальний перетворювач в схемі наведеній вище дорівнюватиме:

$$I_x = \frac{E}{R_x + \frac{R}{3} + R_{\text{ВП}}}, \quad (4.1)$$

де $R_x = R_a || R_b || R_c$; $R_{\text{ВП}}$ – внутрішній опір вимірювального перетворювача ВП.

При цьому відносна зміна струму GI_x , викликана відносними змінами опору GR_x , визначається:

$$GI_x = \frac{GR_x}{1 + \left(\frac{R}{3} + R_{\text{ВП}}\right) * R_x}. \quad (4.2)$$

З огляду на наведене вище вираз, можна зробити висновок, що при малих значеннях R_x (10..100) к до виконуватиметься умова $R / 3 + R_{\text{ВП}} > R_x$, що знизить чутливість схеми. Для збільшення чутливості необхідно виконання умови $R / 3 + R_{\text{ВП}} \ll R_x$, для чого необхідно використовувати високостабільне джерело постійного струму. Напруга цієї схеми має бути не менше сотень

вольт, а в деяких випадках і декількох кіловольт, тому при практичній реалізації виникає ряд технічних труднощів.

Отже, недоліками цих схем є:

- залежність результатів вимірювань від нестабільної напруги зовнішніх джерел;
- низька чутливість (точність);
- нелінійність шкали приладу.

На рис. 3.1.b показана схема з використанням мостового методу вимірювання опору ізоляції, який частково позбавлений вищевказаних недоліків. Але мінусами його використання є:

- складності з впровадженням автоматизації вимірювального процесу через використання високовольтних пристроїв;
- використання великої кількості високовольтних прецизійних резисторів.

Одним з методів, що використовуються в щоб пристроях малої точності, є логометричний метод. Це дуже цікаво з практичної точки зору. В основі розробки цього методу лежить використання магнітоелектричних логометрів. Блок-схема вимірювання опору ізоляції логометричним методом представлена на рис. 3.2. Вимірювальний перетворювач логометричного типу включає в себе джерело постійної напруги E , шунт R_{sh} , диференційний підсилювач DP і вимірювач відносини напруг U_i / U_r ВВН.

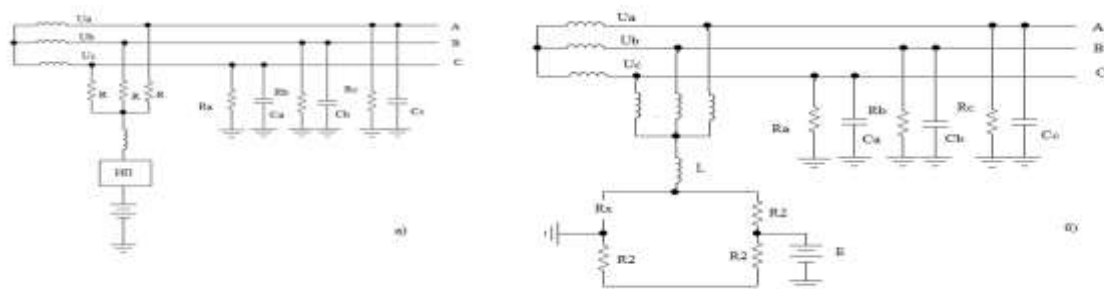


Рис. 3.1. Структурна схема вимірювача опору ізоляції:

а – з стороннім джерелом; б – на основі мостового методу

Диференційний посилювач формує напругу U_i , пропорційну струму витоку ізоляції:

$$U_i = R_{ш}K_{дп}I_x. \quad (4.3)$$

Ця напруга подається на один з входів ВВН, на другий вхід подається напруга U_r , під яким знаходиться ізоляція,

$$U_r = I_x R_x. \quad (4.4)$$

На виході ВВН формується сигнал:

$$N_x = \frac{U_i}{U_r} = \frac{R_{ш}K_{ду}}{R_x}. \quad (4.5)$$

Так, як на результат впливає реактивна складова то вимоги до швидко змінної складової нестабільного джерела напруги – жорсткі, як видно з формули (3.1) вона не залежить від нестабільного джерела постійної напруги, але впливає струм споживаючий низько потенційним входом $I_{нв}$ вимірювального перетворювача. Врахувавши струм $I_{нв}$ формула (3.1) набуде вигляду:

$$N_x = \frac{R_{ш}K_{ду}}{R_x} \left(1 - \frac{I_{нв}}{I_x} \right). \quad (4.6)$$

Погрішність виміру може досягати великих величини, оскільки струм $I_{нв}$ може бути порівняно з струмом витоку опору ізоляції.

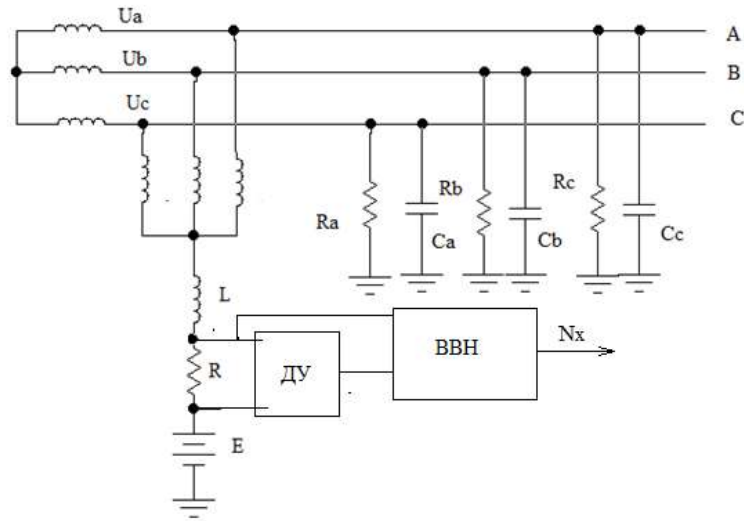


Рис. 3.2. Структурна схема вимірювача опору ізоляції логометричного типу

Вдосконалений варіант логометричної схеми вимірювання опору ізоляції наведено на рис. 3.3. Схема містить диференційний підсилювач ДУ, реалізований на операційних підсилювачах DA1 і DA2 за схемою інвертор-суматор, при цьому вихідна напруга DA2 прямопропорційна U_R . Використання інвертуючих підсилювачів для побудови диференціального підсилювача надає зменшити похибку через синфазну складову вхідного сигналу, та заодно сформувати сигнал, що коректує похибку власного споживання ДУ. Операційні підсилювачі DA3 і DA4 служать для компенсації впливу вхідного струму ДУ, завдяки чому вихідна напруга DA4 формується прямо пропорційним I_x .

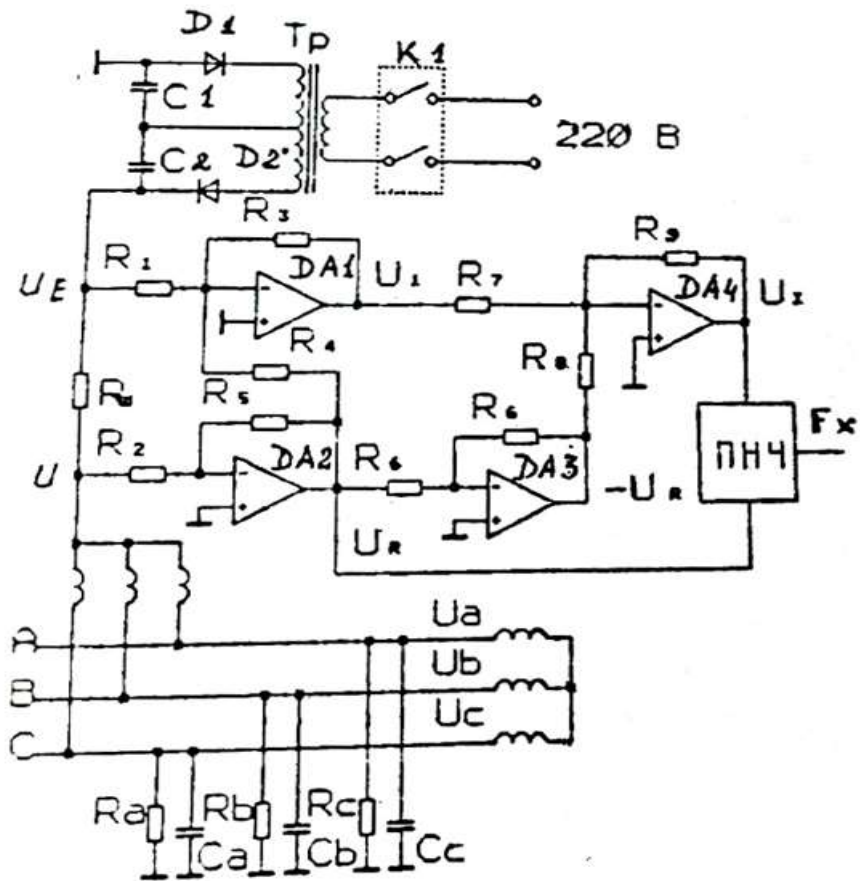


Рис. 3.3. Структурна схема вимірювача опору ізоляції логометричного типу з корекцією

3.2. Проектування вимірювального перетворювача

На рис. 3.4. зображена структурна схема для контролю стану ізоляції високовольтного обладнання, а на рис. 3.5 – функціональна схема.

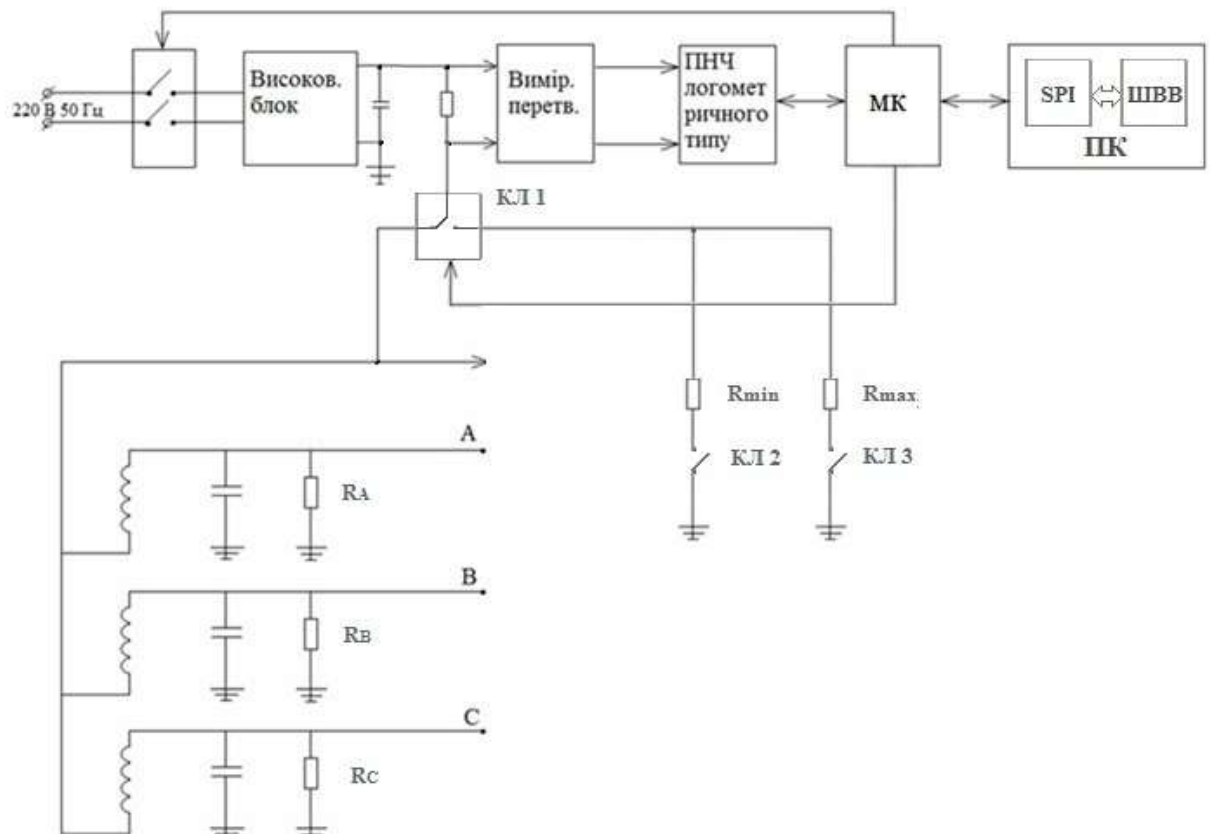


Рис. 3.4. Структурна схема контролю стану ізоляції

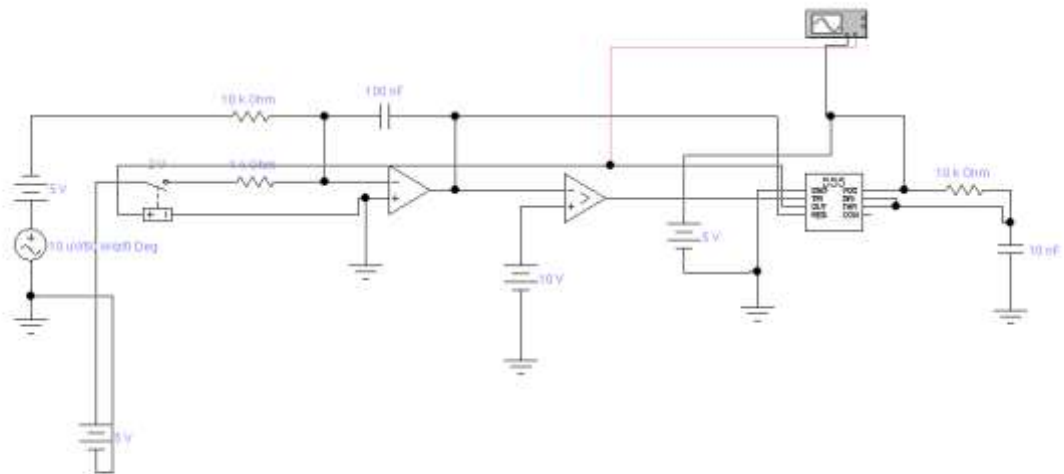


Рис. 3.5. Функціональна схема контролю стану ізоляції

Електроживлення схеми (рис. 3.5) здійснюється від джерела постійної напруги E . Експериментально встановлено, що для харчування проектованої схеми на момент вимірювання буде досить конденсатора ємністю 1 мкФ.

Операційні підсилювачі DA1 і DA2 реалізують диференційний підсилювач за схемою суматора інвертора. Диференціальний підсилювач реалізований на операційних підсилювачах, оскільки він знизить похибка синфазної складової вхідного сигналу і формуватиме сигнал, що виправляє похибка власного споживання. Напруга на підсилювачі DA2 дорівнює напрузі U_R . Операційні підсилювачі DA3 і DA4 призначені для компенсації впливу вхідного струму DP, так що вихідна напруга на DA4 стає рівним напрузі U_I .

Напруги U_R і U_I надходять на входи логотричного типу PNC, вихідна частота яких F_x прямо пропорційна відношенню U_I / U_R . Під час вимірювання вихідний частоти PNC періодичне відключення джерела напруги E використовується для зменшення впливу швидко змінюється складової нестабільності напруги.

Вимірювання починається з заряду конденсатора C1 до повної ємності, після чого ключ K1 відкривається і вимір починається після паузи, необхідної для загасання перехідних процесів в схемах згладжування підсилювачів DA1 і DA2.

Напруга на виході DA1 позначимо U_I , напругу на виході DA2 – U_R , напруга на виході DA4 – U_I .

$$U_I = -U_E \frac{R_3}{R_1} - U_R \frac{R_3}{R_4}; \quad (4.8)$$

$$U_R = -\frac{U_E R_x || R_2}{R_{ш} + R_x || R_2} \frac{R_5}{R_2} = -\frac{U_E R_5}{R_{ш}(1 + R_2 R_x) + R_2}; \quad (4.9)$$

$$U_I = -U_I \frac{R_9}{R_7} + U_R \frac{R_9}{R_8} = U_E \frac{R_3 R_9}{R_1 R_7} + U_R \left(\frac{R_3 R_9}{R_4 R_7} + \frac{R_9}{R_8} \right). \quad (5.0)$$

Вихідний сигнал ПНЧ визначається співвідношенням:

$$\frac{U_I}{U_R} = \frac{U_E R_3 R_9}{U_R R_1 R_8} + \frac{R_3 R_9}{R_4 R_7} + \frac{R_9}{R_8} = \frac{R_3 R_9}{R_4 R_7} + \frac{R_9}{R_8} - \frac{R_3 R_9 \left[R_{ш} \left(1 + \frac{R_2}{R_x} \right) + R_2 \right]}{R_7 R_1 R_5}. \quad (5.1)$$

Так, як на спроектованій схемі $R_1=R_2=1000$ кОм і $R_3=R_4=R_5=5$ кОм, отримуємо:

$$\frac{U_I}{U_R} = \frac{R_9}{R_8} - \frac{R_{ш} R_6}{R_1 R_7} - \frac{R_{ш} R_9}{R_x R_7}. \quad (5.2)$$

Резистори R_9 , R_8 , R_1 і $R_{ш}$ підібрані так, що умова :

$$\frac{R_9}{R_8} - \frac{R_{ш} R_6}{R_1 R_7} = 0 \text{ або } R_{ш} R_8 = R_1 R_7, \quad (5.3)$$

виконується, отримуємо:

$$\left| \frac{U_I}{U_R} \right| = \frac{R_{ш} R_9}{R_x R_7}. \quad (5.4)$$

Таким чином , період вихідної частоти ПНЧ прямо пропорційний вимірюваному опорі і не залежить від напруги джерела постійного струму, а також від вхідного струму диференційного посилювача ДУ.

При цьому була перевірена лінійність перетворення вимірювального перетворювача на діапазонах (100..1000) кОм. Перевірка проводилася за допомогою зразкових резисторів після попереднього градуювання вимірювального перетворювача по двом крайнім точкам R_{max} , R_{min} по формулі:

$$R_x = R_{min} + \frac{N_x - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} (R_{max} - R_{min}), \quad (5.5)$$

де N_{max} , N_{min} - періоди вихідний частоти ПНЧ, відповідні R_{max} , R_{min} ; N_x - період вихідної частоти ПНЧ, відповідний R_x .

Після проведення експериментів на (10..100) кОм зі схемою. Були отримані результати наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Результати експериментів.

№	R, кОм	N _x , мВ	N _{max} , мВ	N _{min} , мВ	R _x , кОм	δ	δ, %
1	10	19.7	197	19.7	10	0	0
2	20	39.6	197	19.7	200,4102	0,002051	0,2051
3	30	59.4	197	19.7	300,7194	0,00239	0,2398
4	40	79.2	197	19.7	400,9273	0,00231	0,2318
5	50	99	197	19.7	501,034	0,00206	0,2068
6	60	118	197	19.7	600,888	0,00148	0,148
7	70	138	197	19.7	701,045	0,00149	0,1492
8	80	158	197	19.7	800,6969	0,00087	0,0871
9	90	178	197	19.7	900,3484	0,00038	0,03871
10	100	197	197	19.7	100	0	0

Для знаходження вимірюваного опору скористаємося формулою (5.5), виразивши з неї R_x, отримаємо:

$$R_x = R_{min} + \frac{N_x - N_{min}}{N_{max} - N_{min}} (R_{max} - R_{min}). \quad (5.6)$$

Підставивши в формулу значення з таблиці 1, отримаємо:

$$R_{x1} = 100 + \frac{19.7 - 19.7}{197 - 19.7} (1000 - 100) = 10 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x2} = 100 + \frac{39.6 - 19.7}{197 - 19.7} (1000 - 100) = 20,4102 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x3} = 100 + \frac{59.4 - 19.7}{197 - 19.7} (1000 - 100) = 30,7194 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x4} = 100 + \frac{792,7 - 19,7}{1977 - 19,7} (1000 - 100) = 40,9273 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x5} = 100 + \frac{99,6 - 19,7}{197 - 19,7} (1000 - 100) = 51,034 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x6} = 100 + \frac{118 - 19,7}{197 - 19,7} (1000 - 100) = 60,888 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x7} = 100 + \frac{138 - 19,7}{197 - 19,7} (1000 - 100) = 71,045 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x8} = 100 + \frac{158 - 19,7}{197 - 19,7} (1000 - 100) = 80,6969 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x9} = 100 + \frac{178 - 19,7}{197 - 19,7} (1000 - 100) = 90,3484 \text{ (кОм)}.$$

$$R_{x10} = 100 + \frac{197 - 19,7}{197 - 19,7} (1000 - 100) = 100 \text{ (кОм)}.$$

Визначимо відносну похибку:

$$\delta = \frac{R_x - R}{R_x} 100\%, \quad (5.6)$$

де R_x – значення вимірюваного опору, R – опір приладу.

Підставивши в формулу (3.4) значення з таблиці 1, отримаємо:

$$\delta_1 = \frac{10 - 10}{10} 100\% = 0\%. \quad (5.7)$$

$$\delta_2 = \frac{20,4102 - 20}{20} 100\% = 0,2051\%.$$

$$\delta_3 = \frac{30,7194 - 30}{30} 100\% = 0,2398\%.$$

$$\delta_4 = \frac{40,9273 - 40}{40} 100\% = 0,2318\%.$$

$$\delta_5 = \frac{51,034 - 50}{50} 100\% = 0,2068\%.$$

$$\delta_6 = \frac{60,888 - 60}{60} 100\% = 0,148\%.$$

$$\delta_7 = \frac{71,045 - 70}{70} 100\% = 0,1492\%.$$

$$\delta_8 = \frac{80,6969 - 80}{80} 100\% = 0,0871\%.$$

$$\delta_9 = \frac{90,3484 - 90}{90} 100\% = 0,0381\%.$$

$$\delta_{10} = \frac{100 - 100}{100} 100\% = 0\%.$$

За отриманими даними побудуємо графік зображений на рис. 3.6. Також з результатів слідує, модель пристрою для виміру ізоляції електричного обладнання має відносну похибку вимірювання меншу за 0.5%.

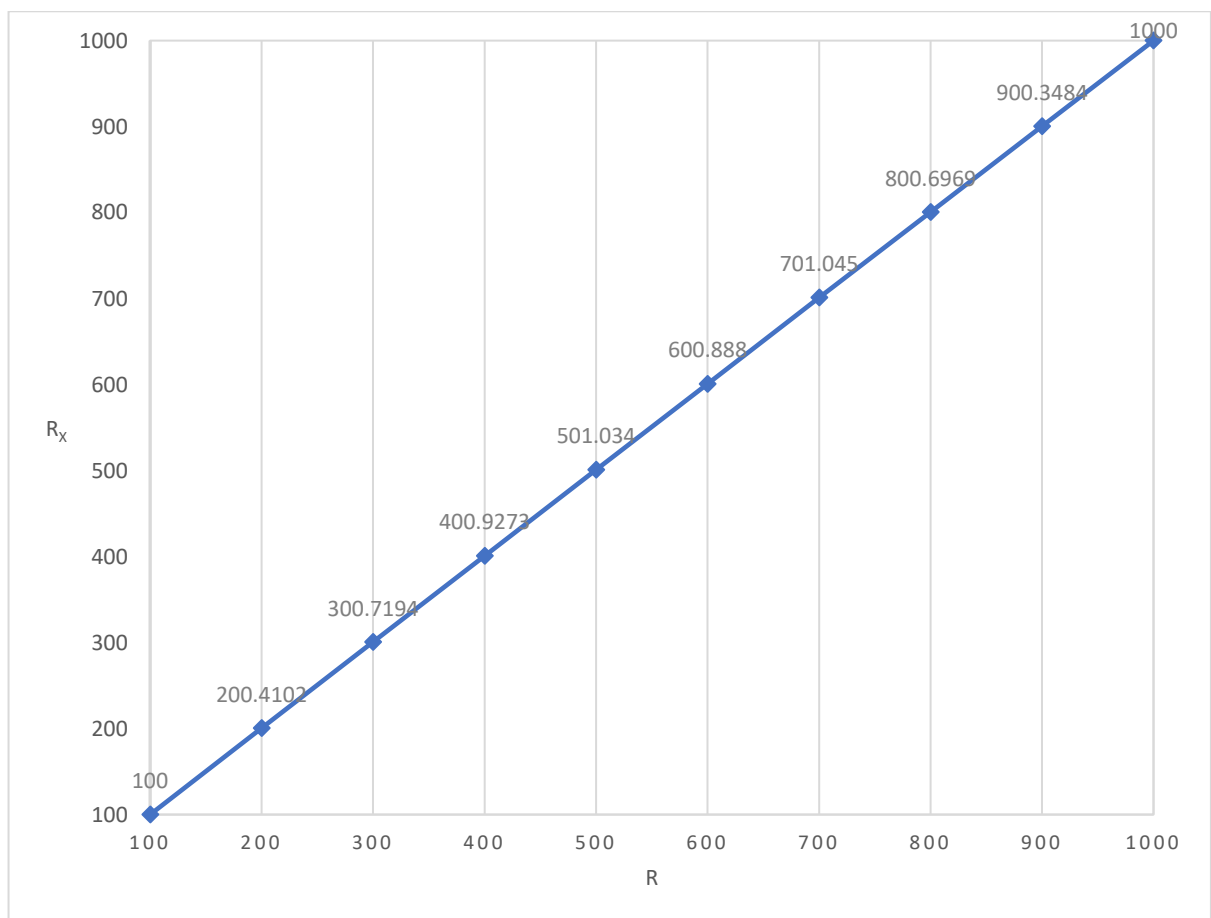


Рис. 3.6. Графік залежності вимірюваного опору до опору обладнання

