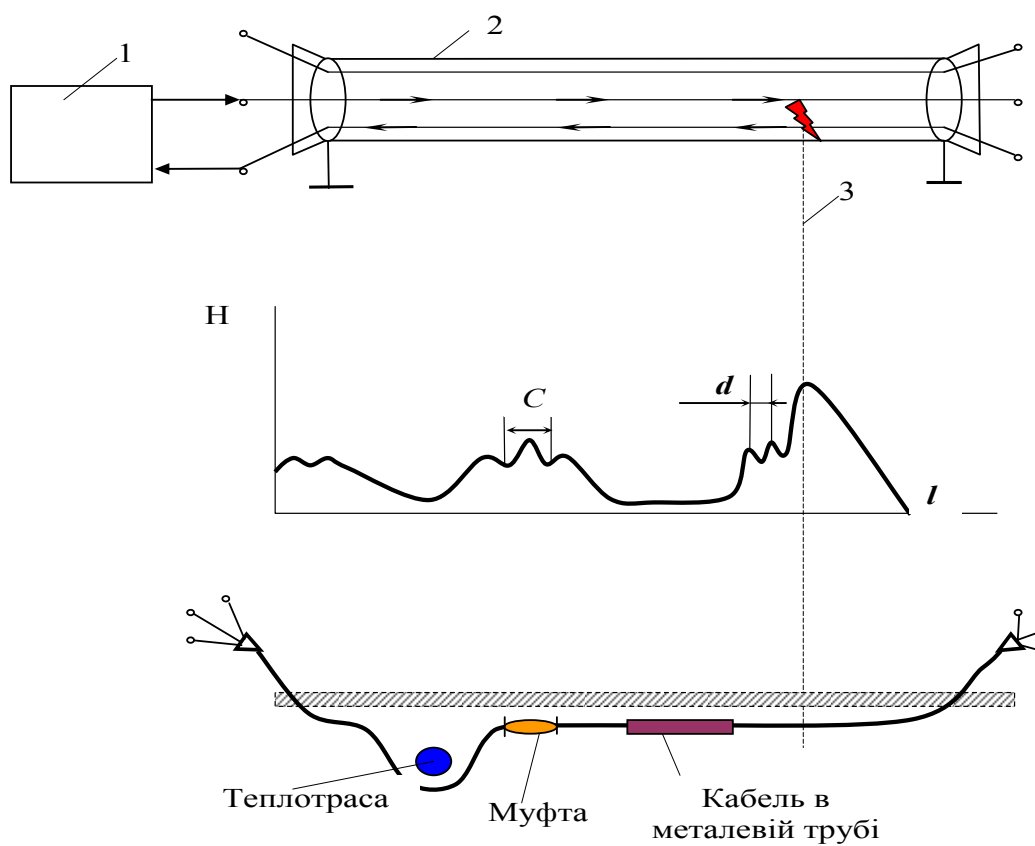


М. О. Головатюк, В. О. Леонтєв, В. А. Видмиш

ЕКСПЛУАТАЦІЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

М. О. Головатюк, В. О. Леонтєв, В. А. Видмиш

Експлуатація кабельних ліній електропередачі

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів напрямку підготовки «Електричні системи і мережі». Протокол №13 від 3 липня 2008 р.

Вінниця ВНТУ 2009

УДК 621.311
Г 61

Рецензенти:

В. В. Назаров, доктор технічних наук, професор
М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор
О. Д. Демов, кандидат технічних наук, доцент

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

Головатюк М. О., Леонтєв В. О., Видмиш В. А.

Г 61 **Експлуатація кабельних ліній електропередачі.** Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 109 с.

В посібнику розглянуто задачі та зміст технічного нагляду при спорудженні кабельних ліній, визначення допустимих навантажень за умов експлуатації та проектування ліній, контролю за навантаженням, вплив блукаючих струмів на кабельну лінію, види випробувань, характер пошкоджень і методи визначення місць пошкоджень.

УДК 621.311

© М. О. Головатюк, В. О. Леонтєв, В. А. Видмиш, 2009

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Задачі та зміст технічного нагляду при спорудженні кабельної лінії.....	6
2 Визначення допустимого тривалого струмового навантаження на кабельну лінію.....	9
3 Контроль за навантаженнями і напругою в кабельних мережах.....	23
4 Навантаження кабельних ліній.....	34
4.1 Коректування припустимих навантажень контролем нагрівання кабелів.....	34
4.2 Контроль за навантаженнями та міри покращення охолодження кабельних ліній.....	36
5 Блукаючі струми, їх вимірювання та способи захисту металевих оболонок кабельних ліній від корозії.....	38
6 Порядок з'ясування причин пошкоджень.....	44
7 Визначення місця пошкодження в кабельних лініях.....	45
7.1 Види пошкоджень кабельних ліній.....	45
7.2 Структура системи пошуку місць пошкоджень.....	46
7.3 Попереднє визначення виду пошкодження кабельної лінії.....	47
8 Вимірювання електричного опору металевих елементів конструкції кабелів.....	48
8.1 Вимірювання електричного опору за допомогою мостів постійного струму.....	48
8.2 Визначення місця ушкодження в кабелі за допомогою вимірювання опору жил.....	51
9 Вимірювання електричного опору ізоляції кабелів і проводів.....	53
9.1 Загальні відомості.....	53
9.2 Вимірювання електричного опору і ємності з застосуванням магнітоелектричного гальванометра.....	56
9.3 Вимірювання електричного опору з застосуванням схем з підсилювачами.....	59
10 Вимірювання повного опору, тангенса кута діелектричних втрат і ємності кабелів.....	62
10.1 Загальні відомості.....	62
10.2 Вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат.....	64
10.3 Вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат при частотах $10^3 - 10^6$ Гц за допомогою мостів.....	68
11 Випробування підвищеною напругою.....	74
11.1 Класифікація, призначення і загальні методи випробувань.....	74
11.2 Електроустаткування при випробуваннях змінною і постійною напругами.....	75
11.3 Випробування імпульсами високої напруги.....	81

12 Пропалювання ізоляції силових кабелів.....	84
12.1 Пропалювання ізоляції кабельних муфт.....	84
12.2 Пропалювання ізоляції кабелю.....	85
12.3 Порухення металевого спаю/зварки при однофазних пошкодженнях	87
13 Методи визначення відстані до місця пошкодження кабельних ліній (відносні методи).....	89
13.1 Імпульсний метод.....	89
13.2 Метод коливального розряду.....	91
13.3 Хвильовий метод.....	92
13.4 Петльовий метод.....	94
14 Методи визначення місця пошкодження на трасі кабельної лінії (абсолютні методи).....	96
14.1 Акустичний метод.....	96
14.2 Індукціо-імпульсний метод.....	98
14.3 Індукційні методи.....	99
14.3.1 Визначення траси кабельної лінії.....	99
14.3.2 Визначення глибини прокладення кабельної лінії.....	100
14.3.3 Визначення шуканого кабелю в пучці кабелів.....	100
14.3.4 Визначення місця міжфазного пошкодження кабельної лінії.....	102
14.3.5.Визначення однофазних пошкоджень кабелю (метод “аномалії нуля”).....	104
14.4 Визначення місця пошкодження в ізолюючій пластмасовій зовнішній оболонці кабелю	104
15 Обладнання і прилади, які необхідні для визначення місця пошкодження силових кабелів.....	106
Література	108

Вступ

Кабельні лінії - одна з найвідповідальніших ланок в системі надійного забезпечення споживачів електричною енергією. Вони виконуються за допомогою різних інженерних споруд (траншеї, тунелі, блоки та інші) з метою забезпечення архітектурних та технічних вимог, тому це і зумовлює їх особливість функціонування в умовах експлуатації. Крім цього, вони капіталоемніші, порівняно з повітряними лініями електропередачі, потребують висококваліфікованого персоналу та складного і дорогого обладнання для технічного обслуговування і ремонтів.

Використання діагностування дозволяє проводити ремонтно-відновлювальні роботи кабельних ліній із урахуванням їх технічного стану, тобто в тих випадках, коли порушення будь-якого елементу конструктивного виконання лінії сягає значень, при яких подальша робота може призвести до відмови будь-якого елементу.

Метою діагностування є забезпечення найбільш економічної експлуатації кабельних ліній, як одного з основних елементів розподільних мереж, при заданому рівні надійності та скорочення до мінімуму витрат на технічний ремонт та обслуговування. Ця мета досягається визначенням технічного стану, що дозволяє своєчасно попередити відмови, зменшити термін простою через пошкодження, проводити комплекс заходів із підтримки функціонування кабельних ліній.

Основна задача діагностування кабельних ліній полягає в отриманні достовірної інформації про їхній технічний стан. Технічний стан кабельної лінії може бути такий:

- режим нормального функціонування, робота під діючою напругою;
- лінія відімкнена – явних пошкоджень ізоляції, струмоведучих жил, кінцевих муфт немає. Необхідно провести технічне обслуговування, тобто оцінити параметри лінії;
- аварійний стан – кабельна лінія пошкоджена, необхідно визначити місце пошкодження.

1 Задачі та зміст технічного нагляду при спорудженні кабельної лінії

Пошкодження кабельної лінії пов'язане з перериванням подачі електроенергії, нанесенням збитку не одному господарству і, звичайно, призводить до значних затрат праці та матеріалів на ремонт ліній і відновлення нормального режиму роботи мережі. Діючі конструкції вітчизняних силових кабелів забезпечують високу надійність їх роботи в умовах експлуатації. Електрична міцність ізоляції кабелів настільки велика, що електричний пробій ізоляції при номінальній напрузі виключається.

Не зважаючи на це, рівень пошкодження кабельних ліній все ще залишається дуже високим і в міських мережах складає 10 і більше пошкоджень за рік на кожні 100 км загальної довжини кабельних ліній, які знаходяться в експлуатації, що причиною пошкоджень кабельних ліній в абсолютній своїй більшості випадків є механічні пошкодження, які завдаються кабелям в процесі експлуатації при проведенні земляних робіт на трасах, а також дефекти прокладання та монтажу муфт, допущені в період спорудження кабельної лінії.

Високий рівень пошкодження кабельних ліній вносить стихійність в роботу персоналу і не дає змоги вести планомірну, систематичну роботу із підвищення надійності, забезпечення високої якості і економічності роботи мережі, віддаючи кошти і сили на трудомісткі роботи із ліквідації пошкоджень і виконання аварійно-відновлювальних ремонтів кабельних ліній.

Для виключення можливості механічного пошкодження як діючих, так і тих кабельних ліній, які споруджуються знову, правила технічної експлуатації електричних станцій та мереж (ПУЕ) радять експлуатаційному персоналу вести технічний нагляд за роботами із прокладання кабелю і монтажу муфт, які виконуються будівельно-монтажними організаціями при спорудженні нових кабельних ліній. Цими ж правилами також передбачено, що розкопування на трасах кабельних ліній або земляні роботи поблизу них можуть проводитись тільки з письмового дозволу підприємства електромережі.

Задачею технічного нагляду є забезпечення високої якості скритих робіт, якими є прокладання кабелю і монтаж муфт, котрі виконані різними будівельно-монтажними підрядними організаціями, а також нагляд за земляними роботами, які ведуться різними організаціями на трасах діючих кабельних ліній або поблизу них при будівництві, реконструкції і ремонті підземних споруд.

Висока якість, стійка і надійна робота як кабельних ліній, які знову споруджуються після впровадження в експлуатацію, так і діючих кабельних ліній може бути забезпечена при умові точного виконання персоналом будівельно-монтажної організації таких вимог: правил

улаштування електроустановок; проектних рішень, прийнятих при розробці траси і споруджень кабельної лінії; технічних умов, заданих при узгодженні проекту; правила технічної експлуатації електричних станцій та мереж із здійснення технічного нагляду і організації охорони діючих кабельних ліній для захисту їх від механічних пошкоджень при проведенні земляних робіт. За своїм змістом робота представника експлуатації, який здійснює технічний нагляд за спорудженням кабельної лінії може бути розділена на три періоди: період підготовки до ведення робіт, період виконання робіт (риття траншеї, прокладання кабелю і монтаж муфт) і період завершення робіт (здача, прийом і введення лінії в експлуатацію). Для кожного з вищевказаних періодів проведення робіт представником технічного нагляду розробляються технічні та організаційні заходи, метою яких є:

перевірка якості, об'єму, змісту проекту спорудження кабельної лінії і графічного матеріалу відповідно до вимог інструкції з розробки для промислового будівництва (СН-202-69);

встановлення можливості якісного виконання будівельно-монтажною організацією прийнятих на себе робіт зі спорудження кабельної лінії, наявність в цій організації кваліфікованого персоналу робітників і монтерів-кабельників, які допущені до монтажу муфт і мають спеціальне посвідчення, що дає право виконувати монтажні роботи, як це передбачено вимогами технічної документації на муфти для силових кабелів з паперовою та пластмасовою ізоляцією до 35 кВ;

забезпечення високої якості будівельних і монтажних робіт при спорудженні кабельної лінії, виконання при цьому вимог гл. II-3 ПУЕ, а також ПТЕ щодо захисту діючих кабельних ліній від механічного пошкодження в процесі виконання розкопувань і споруджень траншей за технологією, організація охорони кабельних ліній;

виконання вимог інструкції із топографічно-геодезичних робіт для міського, селищного і промислового будівництва (СН-212-62) при розбиванні траси лінії, а також зніманні виконаного прокладання кабелів і введення їх до складу мережі для складання виконавчої документації.

Технічний нагляд за покладанням кабелю і монтажем муфт, який здійснюється експлуатаційним персоналом, є найголовнішим протиаварійним заходом, і тому ці роботи повинні плануватися і передбачатися в експлуатаційних планах та графіках разом з іншими роботами із ремонту і експлуатаційного обслуговування мережі. Представники технічного нагляду повинні вибиратися з числа найбільш кваліфікованої і дисциплінованої частини персоналу підприємства електромережі.

В процесі проведення робіт із спорудження кабельної лінії і до моменту їх закінчення складається технічна документація. За своїм змістом та призначенням технічна документація на кабельну лінію складається з двох частин: виконавчої документації, яка складається

будівельно-монтажною організацією (замовником) і передається нею підприємству електромережі при поданні лінії до здачі в експлуатацію, і документації, яка складається експлуатаційним персоналом підприємства електромережі до моменту введення нової лінії в експлуатацію, зміст якої буде розглянутий пізніше.

До першої частини відносяться:

- проект кабельної лінії, який має в своєму складі рішення щодо антикорозійного захисту за всіма узгодженнями і перелік всіх відхилень від проекту із вказівкою, з ким і коли ці відхилення узгоджені;

- звірене із натурою виконавче креслення траси з масштабом 1:500 або 1:200 з усіма прив'язками кабельної лінії та муфт до капітальних споруджень або спеціально встановлених орієнтирів (пикетів), затверджений технічним наглядом підприємства електромережі;

- акти на приховані роботи, якими є огляд кабелю, котрий прокладений в траншеї, пристрої "постелі", підтипів, захисту кабельної лінії від механічних пошкоджень, відповідність габаритів місць взаємного зближення та перетину кабельної лінії, яка споруджується, з трубопроводами та іншими підземними спорудами вимогам ПУЕ, а також на монтаж всіх з поновних на лінії муфт;

- акт перенесення в натуру проекту траси та правильності виконання робіт із розбивання траси;

- акти прийому траншей, блоків, труб та тунелів для монтажу кабелів;

- протокол прогрівання кабелів на барабанах перед прокладанням, якщо роботи проводились при температурі нижче 0°C;

- акт прийому будівельної частини кабельних споруд для проведення монтажних робіт;

- журнал прокладання кабелів і монтажу муфт;

- акт випробування кабельної лінії після прокладання.

Під час приймання кабельної лінії в експлуатацію перед її увімкненням проводиться:

- визначення цілості жил кабелів та фазування жил;

- вимірювання опору заземлення кінцевих муфт;

- перевірка дії встановлених на лінії пристроїв антикорозійного захисту від блукаючих струмів;

- випробування ізоляції лінії підвищеною напругою постійного струму.

2 Визначення допустимого тривалого струмового навантаження на кабельну лінію

Вимогами Правил технічної експлуатації передбачається, щоб для кожної кабельної лінії при введенні її в експлуатацію були встановлені найбільші допустимі струмові навантаження. Ці вимоги ПТЕ обумовлені тим, що тривале навантаження кабельної лінії може викликати перегрів ізоляції вище допустимої норми, її передчасне старіння, а надалі і пошкодження в результаті теплової нестійкості кабелю. Через це струмові навантаження на кабельній лінії встановлюються такими, щоб нагрів струмоведучих жил не перевищував певних значень, отже можливість перегріву ізоляції була б виключена.

Діючими ДСТУ для кабелів з просоченою паперовою ізоляцією і з пластмасовою ізоляцією встановлені такі максимально допустимі значення температур для струмоведучих жил.

При номінальній напрузі	Паперова ізоляція, °С	Пластмасова ізоляція, °С
до 3 кВ	80	70
те ж 6 кВ	65	70
те ж 10 кВ	60	70
те ж 20-35 кВ	50	70

В режимі короткого замикання ПУЕ допускається короткочасне підвищення температури струмоведучих жил для кабелів з паперовою ізоляцією напругою до 10 кВ з мідними та алюмінієвими жилами до 200°C, на напругу 20-35 кВ - 125°C, кабелів з полівінілхлоридною ізоляцією до 150°C, а з поліетиленовою - до 120°C. В процесі експлуатації силового кабелю в ньому виділяється значна кількість тепла. Джерелом його є тепло, яке виділяється в струмоведучих жилах при проходженні електричного струму навантаження, а також для кабелів високої напруги і одножильних за рахунок втрат в ізоляції, металевих оболонках і броні.

Потужність P , яка переходить в тепло Q , що виділяється в струмоведучих жилах трифазного кабелю, складає:

$$P = Q = I^2 \cdot R \cdot n, \text{ Вт/см,}$$

де I - величина струму навантаження кабелю, А;
 R - опір жил, Ом;
 n - кількість жил (в даному випадку 3).

Таким чином, нагрів кабелю пропорційний квадрату сили струму, який протікає по його струмоведучих жилах, і чим вище струмове

навантаження кабелю, тим вище піднімається температура струмоведучих жил.

Процес підвищення температури жил і нагрівання кабелю не буде безмежним, тому що супроводжується розсіюванням тепла в навколишнє середовище. Одночасно з підвищенням температури кабелю підвищується різниця температур між кабелем та середовищем, в якому він прокладений. Чим вища ця різниця, тим інтенсивніше буде проходити віддача тепла в навколишнє середовище. В певний момент різниця температур досягне такої величини, при якій все тепло, що виділяється, буде переходити в навколишнє середовище і температура струмоведучих жил більше підвищуватись не буде.

Такий стан називається усталеним режимом роботи кабельної лінії. При цьому:

$$Q = \frac{t_{xx} - t_{cp}}{s}. \quad (2.1)$$

Наведений вираз називається тепловим законом Ома, де різниця температур жили та середовища ($t_{xx} - t_{cp}$) в ньому відповідають різниці потенціалів, величина s відповідає опору тепловому потоку або тепловому опору в теплових омах по аналогії з опором R ланцюга електричного струму, а Q - величина теплового потоку - величині електричного струму I .

Величина сумарного теплового опору s кабеля і навколишнього середовища складається із теплового опору: ізоляції кабелю - s_1 , захисних покриттів - s_2 , поверхні кабелю - s_3 , а також навколишнього ґрунту - s_4 .

У випадку прокладання кабелю в блочній каналізації величина сумарного теплового опору повинна враховувати додатково s_5 - опір масивності блоку і s_6 - опір від поверхні блоку до ґрунту.

Таким чином, величина сумарного теплового опору кабелю визначається способом прокладання.

Так, при прокладанні кабелю в землі (траншеї):

$$s = s_1 + s_2 + s_4, \quad (2.2)$$

при прокладанні кабелю в повітрі:

$$s = s_1 + s_2 + s_3. \quad (2.3)$$

Чим менший опір створюється тепловому потоку, тим інтенсивніше буде проходити віддача тепла в навколишнє середовище, тим нижчою буде температура струмоведучої жили і тим більше навантаження можна допустити на кабель. В найсприятливіших умовах відносно теплового режиму знаходиться кабель, прокладений в проточній воді. Вода забезпечує найкращі умови відведення тепла, а завдячуючи наявності течії

опір тепловому випромінюванню в цьому випадку практично рівний нулю. Тому тривалі допустимі навантаження на кабель, прокладений у воді, є найбільшими. При прокладанні кабельної лінії в землі (траншеї) великий вплив на величину теплового опору має склад ґрунту, його здатність втримувати вологу.

Пісок, гравій, які володіють підвищеною шпаруватістю, мають більший опір ніж глиноземи. Наявність повітряних проміжків між кабелем і ґрунтом в траншеї призводить до різкого збільшення теплового опору. Цими обставинами і викликані вимоги ПУЕ про влаштування для кабелів, які прокладаються в землі, знизу підсипання, а зверху засипання мілкою землею, яка не містить камінців, будівельного сміття і шлаку.

Якість ґрунту, його щільне трамбування під час засипання прокладеного в траншеї кабелю мають вирішальний вплив на тепловий режим роботи кабельної лінії. Кабель, прокладений в повітрі, знаходиться в менш сприятливих умовах щодо нагріву, ніж кабель, прокладений в землі. Це пояснюється значною величиною опору тепловому випромінюванню від поверхні кабелю в повітря. Саме тому і допустимі навантаження на кабель, прокладений в повітрі, нижчі, ніж на кабель, прокладений в землі.

В особливо несприятливих умовах щодо нагріву знаходяться кабелі, які прокладаються в блочній каналізації. Послідовне включення низки додаткових теплових опорів, як повітря в каналі, стінок блоку, взаємний підігрів кабелів, які розміщуються в декілька рядів, створюють особливо важкий тепловий режим роботи кабелів блоку. Зрозуміло, що цьому способу прокладання відповідають мінімальні значення допустимих навантажень порівняно з іншими способами прокладання (в землі, в повітрі, в колекторах та тунелях).

Знаючи допустимі за ДСТУ або ТУ температури нагрівання струмоведучих жил, можна визначити величину допустимого струму на кабель:

$$Q = I_{\text{доп}}^2 \cdot R_n = \frac{t_{\text{xx}} - t_{\text{cp}}}{\sum s}, \quad (2.4)$$

звідки:

$$I_{\text{доп}} = \sqrt{\frac{t_{\text{доп}} - t_{\text{cp}}}{R_n \cdot \sum s}} \quad (2.5)$$

де $t_{\text{xx}} = t_{\text{доп}}$ - допустима за ДСТУ температура нагрівання струмоведучої жили кабелю;

t_{cp} - температура середовища, де прокладений кабель;

n - кількість жил кабелю;

ΣS - сумарне значення послідовно увімкнених теплових опорів в теплових опорах.

Таким чином, допустиме розрахункове навантаження на кабель обернено пропорційне ΣS , тобто сумарному значенню послідовно увімкнених теплових опорів самого кабелю і опору зовнішнього середовища (землі або повітря), де прокладено кабель. Тепловий опір не є постійною величиною і збільшується в процесі його експлуатації в зв'язку з висиханням ізоляції і зовнішніх ґрунтів. Тепловий опір землі визначається, як ми вже згадували, пористістю і здатністю ґрунту утримувати вологу.

Дослідні дані показують, що для середніх і великих перерізів тепловий опір самого кабелю складає лише 30 - 35 % від загального теплового опору кабелю і середовища, в якому він прокладений. Тепловіддача в землю або в повітря, таким чином, є вирішальною при визначенні допустимого навантаження на кабель.

Виконання розрахунків допустимих струмів навантажень в кожному окремому випадку і для більшого числа кабельних ліній, які знаходяться в експлуатації, за раніше викладеним способом досить складне, і потребує більших витрат часу і праці. Через це розрахункові значення тривалих допустимих струмів навантаження для кабелів залежно від перерізу, напруги і умов прокладання встановлені ПУЕ і наведені в таблиці 2.1. Із наведених в таблиці 2.1 значень легко вивести співвідношення допустимих навантажень для трижильних кабелів з поясною ізоляцією залежно від виду прокладання. В таблиці 2.2 наводяться ці дані для середніх і великих перерізів кабелю, беручи за одиницю прокладання в землі.

Таблиця 2.1 – Допустимі тривалі розрахункові навантаження для кабелів з мідними (в чисельнику) та алюмінієвими (в знаменнику) жилами з нестійкою і маслостійкою нормально просоченою паперовою ізоляцією в загальній свинцевій або алюмінієвій оболонці, а також з окремо освинцьованими (або окремими опресованими) алюмінієвими оболонками, залежно від умов прокладання

	Струмові навантаження кабелів, А			
Пере- різ жил, мм ²	чотирижильні		трижильні	
	до 1000 В		3000 В	
	Умови прокладання та температура середовища, °С			
	в землі +15°С	в повітрі +25°С	в землі +15°С	в повітрі +25°С
1	2	3	4	5
10	85/65	60/45	95/75	60/46
16	115/90	80/60	120/90	80/60
25	150/115	100/75	160/125	105/80
35	175/135	120/95	190/145	125/95
50	215/165	145/110	235/180	155/120
70	265/200	185/140	285/220	200/155

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
95	310/240	215/165	340/260	245/190
120	350/270	260/200	390/300	285/220
150	395/305	300/230	435/335	330/255
185	450/345	340/260	490/380	375/290
240	-	-	570/440	430/330

	Струмові навантаження кабелів, А					
Пере- різ жил, мм ²	трижильні					
	6 000 В			10 000 В		
	Умови прокладання та температура середовища, °С					
	в землі +15°С	в повітрі +25°С	у воді +15°С	в землі +15°С	в повітрі +25°С	у воді +15°С
	10	80/60	55/43	-	-/55	50/39
16	105/80	65/50	135/105	95/75	60/46	120/90
25	135/105	90/70	170/130	120/90	85/65	150/115
35	160/125	110/85	205/160	150/115	105/80	180/140
50	200/155	145/110	255/195	180/140	135/105	220/170
70	245/190	175/135	310/240	215/165	165/130	275/210
95	295/225	215/165	375/290	265/205	200/155	340/260
120	340/260	250/190	430/330	310/240	240/185	395/305
150	390/300	290/225	500/385	355/275	270/210	450/345
185	440/340	325/250	545/420	400/310	305/235	510/390
240	510/390	375/290	625/480	460/355	350/270	585/450

	Струмові навантаження кабелів, А					
Пере- різ жил, мм ²	трижильні					
	20 000 В			35 000 В		
	Умови прокладання та температура середовища, °С					
	в землі +15°С	в повітрі +25°С	у воді +15°С	в землі +15°С	в повітрі +25°С	у воді +15°С
10	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-
25	110/85	86/76	120/90	-	-	-
35	135/105	100/75	145/110	-	-	-
50	165/125	120/90	180/140	-	-	-
70	200/155	150/115	225/175	195/150	145/110	210/160
95	240/185	180/140	275/210	235/180	180/140	255/195
120	275/210	205/160	315/245	270/210	205/160	290/225
150	315/240	230/175	350/270	310/240	230/175	-
185	355/275	265/205	390/300	-	-	-
240	-	-	-	-	-	-

Таблиця 2.2 - Співвідношення допустимих навантажень залежно від способу прокладання

Пере- різ жил, мм ²	в землі +15°C	в повітрі +25°C	у воді +15°C	в землі +15°C	в повітрі +25°C	у воді +15°C	в землі +15°C	в повітрі +25°C	у воді +15°C
35	1	0.66	1.30	1	0.70	1.28	1	0.70	1.20
70	1	0.70	1.30	1	0.70	1.27	1	0.76	1.28
120	1	0.73	1.30	1	0.73	1.26	1	0.77	1.27
185	1	0.77	1.26	1	0.74	1.24	1	0.76	1.25

Як видно із наведених даних, допустиме навантаження на кабель, прокладений в повітрі, приблизно на 25 - 30 % менше за допустиме навантаження на аналогічний кабель, прокладений в землі. Струмові навантаження, наведені в таблиці 2.1 для кабелів, прокладених в землі, прийняті з розрахунку прокладання одного кабелю в траншеї на глибині 0,7 - 1 м при температурі землі + 15°C і питомому опорі ґрунту 120 Ом·см теплових.

Для кабелів, які прокладені у воді, струмові навантаження в таблиці прийняті із розрахунку температури води +15°C, а у випадку прокладання в повітрі - при температурі повітря, рівній +25°C. В кабельних спорудах в приміщеннях струмові навантаження прийняті для відстаней в проміжку між кабелями не менше 25 мм , а в каналах - не менше 50 мм при будь-якому способі прокладання кабелів. Однак на глибині 0.7 - 1 м така температура в середній частині країни буває лише в червні, липні, серпні.

В січні, лютому, березні температура ґрунту на цій глибині становить приблизно 0°C, а в квітні та листопаді - +5°C, а в травні та в жовтні - +10°C. Тому при визначенні допустимих довготривалих навантажень на кабель в умовах експлуатації районів Крайньої Півночі, вічної мерзлоти, тропіків та ін., коли температура середовища значно відрізняється від встановлених вище значень, використовуються поправкові коефіцієнти, які наведені в таблиці 2.3 та 2.4.

Таблиця 2.3 - Поправкові коефіцієнти на температуру землі

S _{жил} , мм ²	Значення поправкових коефіцієнтів при фактичній температурі землі та води, °C										
	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
80	1.14	1.10	1.08	1.04	1.0	0.96	0.92	0.88	0.83	0.78	0.73
65	1.18	1.14	1.10	1.05	1.0	0.95	0.89	0.84	0.77	0.71	0.63
60	1.20	1.15	1.12	1.06	1.0	0.94	0.88	0.82	0.75	0.67	0.57
55	1.22	1.17	1.12	1.07	1.0	0.93	0.86	0.79	0.71	0.61	0.50
50	1.25	1.20	1.14	1.07	1.0	0.93	0.84	0.76	0.66	0.54	0.37

Таблиця 2.4 - Поправкові коефіцієнти на температуру повітря

S _{жил} , мм ²	Значення поправкових коефіцієнтів при фактичній температурі середовища, °C										
	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25	+30	+35	+40	+45
80	1.24	1.20	1.17	1.13	1.09	1.04	1.0	0.95	0.90	0.85	0.80
65	1.32	1.27	1.22	1.17	1.12	1.06	1.0	0.94	0.87	0.79	0.71
60	1.36	1.31	1.25	1.20	1.13	1.07	1.0	0.93	0.85	0.76	0.66
55	1.41	1.35	1.29	1.23	1.15	1.08	1.0	0.91	0.82	0.71	0.58
50	1.48	1.41	1.34	1.26	1.18	1.09	1.0	0.89	0.78	0.63	0.45

При визначенні допустимих навантажень з врахуванням поправкових коефіцієнтів необхідно враховувати, що під температурою ґрунту слід розуміти максимальну середньомісячну температуру ґрунту на рівні прокладання в даному районі, а при прокладанні в повітрі - найбільшу середньодобову температуру в місці прокладання.

При відсутності цих даних розрахункову температуру ґрунту беруть рівною + 15 °C, а повітря - відповідно + 25 °C. Як було вказано вище, наведені в таблицях розрахункові навантаження передбачають роботу одиночного кабелю, прокладеного в траншеї. При прокладанні кількох кабелів у загальній траншеї допустимі струмові навантаження, вказані в табл. 2.1, необхідно зменшити через взаємний перегрів кабелів.

Поправкові коефіцієнти на кількість кабелів, наведені в табл. 2.5, використовуються при розрахунку допустимих тривалих навантажень в однаковій мірі як для кабелів, які лежать в землі, так і для тих, що лежать в трубах, якщо в них відсутня вентиляція, при цьому резервні з кількості працюючих та прокладених поруч кабелів не враховуються.

Таблиця 2.5 – Поправкові коефіцієнти на кількість працюючих кабелів, що лежать поруч в землі в трубах та без труб

Відстань між кабелями, мм	Кількість кабелів					
	1	2	3	4	5	6
100	1.00	0.90	0.85	0.80	0.78	0.75
200	1.00	0.92	0.87	0.84	0.82	0.81
300	1.00	0.93	0.90	0.87	0.86	0.85

Користуючись □еред. 2.1 допустимих навантажень, □ередньо роз коефіцієнтами на температуру середовища і на число працюючих кабелів, які лежать поруч, проведемо розрахунок допустимого тривалого навантаження на кабельну лінію марки ААБ перерізом 3×185 мм², напругою 10 кВ, яка прокладена в землі, та в пучку з трьома іншими кабелями на період січень – березень місяці (температура ґрунту 0 °C).

1. У табл. 2.1 знаходимо, що допустиме тривале навантаження для такого кабелю з алюмінієвими жилами при прокладанні в землі складає 310 А.

2. Визначаємо значення поправкових коефіцієнтів:

а) K_1 – на кількість працюючих кабелів в траншеї.

Для чотирьох кабелів при відстані між ними 100 мм у табл. 2.5 знаходимо величину $K_1 = 0.8$.

б) K_2 – на фактичну температуру ґрунту в період січень – березень, рівну 0 °С.

У табл. 2.3 знаходимо K_2 , рівний 1.15.

Таким чином:

$$I_{\text{розр}} = I_{\text{доп}} K_1 K_2 = 310 \cdot 0.8 \cdot 1.15 = 285 \text{ А.}$$

Допустиме тривале струмове навантаження цієї кабельної лінії на період липень – вересень місяці, коли температура ґрунту на глибині 0.7-1 м дорівнює 15 °С, складає:

$$I_{\text{розр}} = I_{\text{доп}} K_1 K_2 = 310 \cdot 0.8 \cdot 1 = 248 \text{ А.}$$

Якщо цей самий кабель прокласти в землі, $\square$ ер в трубах з чотирма іншими, то для цих умов прокладання допустиме навантаження має вибиратися із табл. 2.1 як для кабелю, прокладеного в повітрі, тобто 235 А. Тоді для періоду липень – вересень місяці:

$$I_{\text{розр}} = I_{\text{доп}} K_1 K_2 = 235 \cdot 0.8 \cdot 1 = 188 \text{ А.}$$

Для періоду часу січень – березень, відповідно:

$$I_{\text{розр}} = I_{\text{доп}} K_1 K_2 = 235 \cdot 0.8 \cdot 1.15 = 216 \text{ А.}$$

Розрахунки підтверджують наведену в табл. 2.2 велику залежність допустимих навантажень на кабелі від умов прокладання та температури середовища, в якому цей кабель прокладено. При змішаному прокладанні кабелів допустимі тривалі струмові навантаження встановлюються за ділянкою $\square$ ереднь найгіршими тепловими умовами, якщо його довжина складає більше 10 м.

В умовах міст та промислових підприємств перехід через проїзди, вулиці та $\square$ ередньо ро вдосконаленим покриттям, з інтенсивним рухом транспорту має виконуватися в трубах або блоках. З врахуванням цього фактора допустимі навантаження для більшості кабельних ліній міських мереж та промислових підприємств, прокладених в землі, встановлюються як для кабелів, прокладених у повітрі. Ці невеликі ділянки переходів з

найважчими тепловими умовами звичайно мають довжину більшу за 10 м і, таким чином, обмежують пропускну спроможність всієї лінії.

Тому при визначенні навантажень для таких кабельних ліній допустиме навантаження, прийняте згідно з нормами для кабелів, які прокладені в повітрі, має бути перераховане із середньо розрахункової температури повітря + 25 °С на середньо розрахункову температуру ґрунту + 15 °С за формулою:

$$I_{\text{ділянки}} = I_B \sqrt{\frac{t_{\text{ж}} - 15}{t_{\text{ж}} - 25}} = I_B K_3, \quad (2.6)$$

де I_B – допустиме тривале струмове навантаження, визначене з табл. 2.1 для повітря;

$t_{\text{ж}}$ – допустима температура нагріву жил кабелю згідно з ДСТУ.

В табл. 2.6 наведено значення коефіцієнтів K_3 для кабельних ліній напругою 3-35 кВ.

Таблиця 2.6 – Значення поправкових коефіцієнтів K_3

$U_{\text{ном}}$ кабеля, кВ	3	6	10	20-35
Значення коефіцієнта K_3	1.09	1.12	1.13	1.18

Тому користуючись вищенаведеними даними таблиць, виконаємо перерозрахунок довготривалого допустимого навантаження для прийнятої нами лінії перерізом 3×185 кВ·мм та напругою 10 кВ, яка прикладена в землі з переходами, виконаними в трубах, які мають довжину більше 10 м, на період січень – березень ($t = 0$ °С):

$$I_{\text{розр}} = I_{\text{доп}} K_1 K_2 K_3 = 235 \cdot 0,8 \cdot 1,15 \cdot 1,13 = 244 \text{ А.}$$

Для періоду липень – вересень ($t_{\text{ґрунту}} = 15$ °С):

$$I_{\text{розр}} = 235 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 1,13 = 212 \text{ А.}$$

Наведені поправкові коефіцієнти K_3 в табл. 2.6 застосовуються для розрахунку навантажень кабельних ліній, прокладених в азбоцементних та інших ізолюючих трубах. У випадку прокладання кабелів в металевих трубах навантаження можуть бути додатково збільшені для кабелів перерізом до 40 мм² на 4-5 %, а для кабелів 3×95 мм² і вище – на 7-8 %.

В міських мережах з номінальною робочою напругою 6 кВ в ряді випадків прокладаються кабельні лінії з конструктивною напругою 10 кВ, враховуючи перспективу переведення навантажень цих ліній з 6 кВ на 10 кВ. Якщо встановити навантаження на такі кабельні лінії за конструктивною напругою кабелів (допустима температура жил 60 °С), то

пропускна спроможність лінії не буде повністю використана. Якщо ж встановити навантаження на лінії за робочою напругою (допустима температура жил 65 °С), то кабель буде перенавантаженим.

Тому розрахункове навантаження таких ліній може бути перераховане за формулою:

$$I_{\text{роб}} = I_{\text{доп}} \sqrt{\frac{t_{\text{ж}}^{\text{роб}} - t_{\text{навк}}}{t_{\text{ж}}^{\text{к}} - t_{\text{навк}}}} = I_{\text{доп}} K_4, \quad (2.7)$$

де $I_{\text{доп}}$ - навантаження кабелю (табл. 2.1), яке відповідає конструктивній напрузі кабелю;

$t_{\text{ж}}^{\text{роб}}$ - температура жили кабелю, яка допускається для робочої напруги, під якою використовується кабель;

$t_{\text{ж}}^{\text{к}}$ - температура жили кабелю, яка допускається для конструктивної напруги;

$t_{\text{навк}}$ - температура середовища, яке оточує кабель (повітря, ґрунту).

Значення поправкових коефіцієнтів K_4 для визначення навантажень кабелів, які працюють не під конструктивною напругою, для ліній, прокладених в землі та повітрі, наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Поправкові коефіцієнти K_4

Робоча напруга кабелю, кВ	Номінальна (конструктивна) напруга кабелю, кВ							
	Для ліній, які прокладені в землі				Для ліній, які прокладені в повітрі			
	3	6	10	20	3	6	10	20
3	1.00	1.14	1.20	-	1.00	1.17	1.25	-
6	0.878	1.00	1.055	-	0.853	1.00	1.07	-
10	-	0.95	1.00	1.13	-	0.936	1.00	1.18
20	-	-	0.835	1.00	-	-	0.79	1.00

Нехай вищевказана кабельна лінія перерізом $3 \times 185 \text{ мм}^2$ з номінальною напругою 10 кВ, прокладена в землі, а при переході через проїзди в азбоцементних трубах довжиною більше 10 м використовується на напругу 6 кВ. Необхідно визначити допустиме тривале струмове навантаження на цю лінію.

Приймаючи вихідне навантаження для кабелю ААБ – 3×185 – 10 кВ (прокладання в повітрі) рівним 235 А, одержимо:

$$I_{\text{роб}} = I_{\text{доп}} K_4 = 235 \cdot 1.055 = 248 \text{ А.}$$

Значення коефіцієнта K_4 знаходимо з табл. 2.7.

Для періоду липень – вересень ($t_{\text{ґрунту}} = 15 \text{ °С}$):

$$I_{\text{розр}} = 248 \cdot 0.8 \cdot 1.14 = 226 \text{ А.}$$

Для періоду січень – березень ($t_{\text{грунту}} = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$):

$$I_{\text{розр}} = 248 \cdot 0.8 \cdot 1.15 \cdot 1.14 = 260 \text{ А.}$$

В особливо важкому тепловому режимі працюють кабелі, які прокладені в блочній каналізації. Допустимі довготривалі струмові навантаження на кабелі для цього способу прокладання визначаються місцем знаходження кабелю в блоці та конфігурацією самого блока за емпіричною формулою:

$$I_{\text{доп}} = a \cdot b \cdot c \cdot I_0, \quad (2.8)$$

де I_0 – струм, який визначається за початкових температурних умов;
 a – коефіцієнт, який вибирається залежно від перерізу та розміщення кабелю в блоці за табл. 2.8;
 b – коефіцієнт, який вибирається залежно від номінальної напруги кабелю, з табл. 2.9;
 c – коефіцієнт, який вибирається залежно від середньодобового навантаження всього блоку з табл. 2.10.

Струм I_0 , величина якого вибирається залежно від конфігурації блоку та за номером каналу, який займає цей кабель, встановлений для трижильного кабелю перерізом $3 \times 95 \text{ мм}^2$ з мідними та алюмінієвими жилами, з паперовою ізоляцією, на напругу 10 кВ. Канали, в яких прокладається кабель, на рисунках блоків позначені відповідними цифрами. Канали блоків, які не мають номерів, призначені для резервних кабелів. Їх включення може бути проведено тільки за умови попереднього відключення робочих кабелів.

Допустимі тривалі струмові навантаження на кабелі, які прокладаються в двох паралельних блоках однакової конфігурації, повинні зменшуватись шляхом домноження на коефіцієнти, які наведені в табл. 2.8 та 2.9. Значення поправкових коефіцієнтів на навантаження блока наведені в табл. 2.10.

Таблиця 2.8 – Поправкові коефіцієнти a на переріз кабелю

Переріз, мм^2	Величина коефіцієнта при номері каналу блоку			
	1	2	3	4
1	2	3	4	5
25	0.44	0.46	0.47	0.51
35	0.54	0.57	0.57	0.60
50	0.67	0.69	0.69	0.71
70	0.81	0.84	0.84	0.85

Продовження таблиці 2.8

1	2	3	4	5
95	1.00	1.00	1.00	1.00
120	1.14	1.13	1.13	1.2
150	1.33	1.30	1.29	1.26
185	1.50	1.46	1.45	1.38
240	1.78	1.70	1.68	1.55

Таблиця 2.9 - Поправкові коефіцієнти b на переріз кабелю

U _{ном} кабелю, кВ	10	6	до 3
Величина коефіцієнта	1	1.05	1.09

Виконаємо розрахунок допустимого тривалого струмового навантаження на кабель марки АСГТ 3×185 мм², напругою 6 кВ, який прокладено в 4-му каналі групи VI.

Знаходимо значення I₀ = 91 А (VI група, 4-й канал).

З табл. 2.8 поправкових коефіцієнтів на переріз кабелю знаходимо a=1.38 (для перерізу 185 мм² з алюмінієвими жилами і в каналі номер чотири).

З табл. 2.9 поправкових коефіцієнтів на напругу кабелю знаходимо b=1.38.

Таблиця 2.10 - Поправкові коефіцієнти c на середньодобове навантаження блока, які визначаються залежно від відношення середньодобової потужності, яка передається, до номінальної

$\frac{S_{\text{середньодобової}}}{S_{\text{номінальної}}}$	1.00	0.85	0.7
Величина коефіцієнта	1.00	1.07	1.16

Таблиця 2.11 - Коефіцієнти зменшення допустимого струмового навантаження на кабелі, які прокладені в паралельних блоках однакової конфігурації

Відстань між блоками, мм	500	1000	1500	2000	2500	3000
Величина коефіцієнта	0.85	0.89	0.91	0.93	0.95	0.96

Приймаючи величину коефіцієнта c = 1 за табл. 2.10, тобто $\frac{S_{\text{ср.доб}}}{S_{\text{ном}}} = 1$, одержуємо:

$$I_{\text{доп}} = 91 \cdot 1.32 \cdot 1.05 \cdot 1 = 132 \text{ А.}$$

Кабельні лінії внаслідок високої теплоємності ізоляції досягнуть своєї максимально допустимої температури нагріву лише після значного проміжку часу після вмикання навантаження. Якщо кабельна лінія має навантаження з перервами та охолоджується, то максимальна температура нагріву може бути досягнута при більш високому навантаженні. Тому ПТЕ допускають короточасне перевантаження кабельних ліній 6-10 кВ, попереднє навантаження яких менше номінального. На час усунення аварій для кабельних ліній до 10 кВ включно допускається перевантаження протягом 5 діб. Межі допустимих перевантажень для номінального та аварійного режиму роботи мережі залежно від виду прокладання наведені в табл. 2.12. Перевантаження кабельних ліній напругою 20-35 кВ не допускається. Для кабельних ліній напругою до 10 кВ, які знаходяться в експлуатації більше 15 років, значення допустимих перевантажень вказані в табл. 2.12, необхідно зменшити на 10 %.

Таблиця 2.12 - Допустимі перевантаження в нормальному та аварійному режимах

Коефіцієнт попереднього навантаження	Вид прокладання	В нормальному режимі			В аварійному режимі		
		допустимий перегрів відносно до номінального протягом часу, год			допустимий перегрів відносно до номінального при тривалості максимуму, год		
		1.5	2.0	3.0	1	3	6
0.6	в землі	1.35	1.30	1.15	1.50	1.35	1.25
	в повітрі	1.25	1.15	1.10	1.35	1.25	1.25
0.8	в землі	1.20	1.15	1.10	1.35	1.25	1.20
	в повітрі	1.15	1.10	1.05	1.30	1.25	1.25
	в трубах (в землі)	1.10	1.05	1.00	1.20	1.15	1.10

Допустимі довготривалі струмові навантаження на кабельні лінії за нагрівом перевіряються на економічну густину струму, вказану в табл. 2.13, за формулою:

$$q = \frac{I}{j}, \quad (2.9)$$

де I - розрахунковий струм, А;
 j - економічна густина струму для даних умов роботи;

q - економічно доцільний переріз, мм².

Таблиця 2.13 - Економічна густина струму

Тривалість використання максимуму навантаження, год	Економічна густина струму для кабелів, А/мм ²	
	з мідними жилами	з алюмінієвими жилами
До 1000 включно	Не перевіряється	
Від 1000 до 3000	3	1.6
Від 3000 до 5000	2.5	1.4
Більше 5000	2	1.2

Якщо навантаження кабелю, встановлене за економічною густиною струму, перевищує допустиме за нагрівом, навантаження на кабельну лінію повинно бути встановлене за допустимим нагрівом.

3 Контроль за навантаженнями і напругою в кабельних мережах

Встановлені за допомогою розрахунків допустимі довготривалі струмові навантаження з врахуванням пори року (температури ґрунту і повітря) записуються в паспорт кабельної лінії. Якщо в процесі експлуатації умови, за якими був виконаний розрахунок довготривалого допустимого струмового навантаження, змінились в зв'язку із зміною теплового режиму лінії, яке викликане переобладнанням мережі, переведенням лінії на підвищену напругу та ін., встановленого раніше довготривалого допустимого значення навантаження повинно бути переглянуто з врахуванням нових умов теплового режиму лінії. Результати розрахунків допустимих навантажень, порівняння їх із дійсними фактичними навантаженнями лінії, отриманими при вимірюваннях в процесі експлуатації, дозволяють знайти і встановити найбільш економічний режим роботи для кожної лінії. Вказані вище розрахункові навантаження є вихідними при складанні схем електричних з'єднань, проведенні оперативних переключень, в зв'язку з пошкодженнями в мережі, виведенні обладнання і кабельних ліній в ремонт або для профілактичних випробувань.

В умовах експлуатації необхідно знати, однак, не тільки розрахункові довготривалі допустимі навантаження кабелів, але й фактичні їх значення на будь-який момент часу шляхом вимірювань їх безпосередньо на лінії. Вимірювання навантажень і одночасно напруги передбачається найчастіше два рази на рік, в тому числі один раз в період максимуму.

Метою проведення вимірювань є перевірка:

- стану навантажень кабельних ліній та обладнання, виявлення перенавантажених і недонавантажених елементів мережі;
- рівня напруги для визначення якості енергії, яка подається споживачам електроенергії;
- режиму роботи мережі і робочих схем електричних з'єднань РП і ТП;
- економічності експлуатації мережі шляхом розрахунків втрат потужності і електроенергії.

Вимірювання навантажень і напруги виконується на стороні низької напруги за допомогою переносних приладів (вольтметрів, амперметрів і спеціальних струмовимірювальних кліщів). Покази приладів записуються черговим персоналом ЦП в добову відомість навантажень за кожну годину. При відсутності на ЦП чергового персоналу, а також засобів телевимірювань визначення навантажень живильних ліній виконується за щитовими приладами, встановленими в РП на іншому кінці лінії.

Навантаження кабельної лінії розподільної мережі встановлюється також за показниками щитових амперметрів, встановлених в РП. В ТП міської мережі вимірювання навантажень і напруг виконується виключно

на стороні низької напруги вищевказаними переносними приладами. Навантаження вимірюються на силових трансформаторах, всіх відхідних магістральних лініях, а також кабельних вводах перевантажених ліній. Напруга вимірюється в ТП і на найвіддаленішому від ТП ввідному пристрої. Період часу для проведення вимірювання вибирається з таким розрахунком, щоб величина навантаження, яке вимірюється, буде максимальною. Для цього необхідно знати характер навантаження приймачів і час, коли його величина досягає максимального значення.

Максимум навантажень кабельних ліній, які живлять групи різноманітних споживачів, що використовують електроенергію освітлення закладів та побуту, приєднаних до мережі малопотужних електродвигунів, досягається в години збігу роботи, а відповідно й споживання електроенергії вказаними споживачами.

Зимою, коли тривалість світлового періоду дня найменша, існує найбільша ймовірність збігу навантажень. При цьому для масових вимірювань обирається грудень місяць і час від 17 до 22 годин. В листопаді вимірювання визначаються збігом навантажень промислових підприємств з навантаженням освітлення.

Тривалості вечірнього та ранішнього максимуму навантажень порівняно невеликі і становлять від 0.5 години в літній період і до 2-3 годин взимку. Природно, що виконати вимірювання в цей короткий час проходження максимуму одночасно в усіх точках мережі, яка нараховує сотні ТП, тисячі кабельних ліній і ввідних пристроїв експлуатаційному персоналу неможливо. Таким чином період вимірювання максимальних навантажень доводиться брати більш тривалим, не дивлячись на те, що навантаження, яке при цьому вимірюється, не відповідає і дещо менше за максимальне.

Для зведення вимірюного при цьому навантаження до значення відповідного йому максимуму, застосовують підвищувальні поправкові коефіцієнти, значення яких беруть від 5 до 20 % залежно від часу вимірювання на основі аналізу типового графіка міської мережі. Для вимірювання та контролю навантажень окремих кабельних ліній, які живлять промислові підприємства, та інших характерних навантажень практикується встановлення добових та тижневих самописних приладів.

Одночасно із зміною навантаження і напруги, обслуговуючий персонал може перевірити стан ізоляції лінії. При роботі мережі низької напруги в режимі ізолюваної нейтралі стан ізоляції легко може бути визначений вимірюванням напруги між фазою та землею. При повному пошкодженні ізоляції величина напруги між фазою, на якій ізоляція пошкоджена, і землею дорівнює нулю. Якщо ізоляція лінії в гарному стані, напруга всіх фаз відносно землі однакова і за величиною дорівнює фазній напрузі лінії. Порушення ізоляції кабельних ліній в мережі напругою вище 1000 В визначається черговим персоналом центру живлення з роботи пристрою сигналізації замикання на землю - щита управління.

Ізоляція кабельних ліній мережі до 1000 В, працює в режимі глухо заземленої нейтралі, перевіряється шляхом відключення і випробування лінії мегомметром, що виконується при проведенні капітального ремонту ТП. Вимірювання напруги виконується в характерних точках мережі для максимального і мінімального режимів навантаження. Технічно допустимою напругою називається така, величина якої при максимальних та мінімальних навантаженнях не виходить за встановлені межі відхилення від номінального значення.

Згідно з ПУЕ, відхилення напруги на затискачах електродвигунів не повинно бути більшим за $\pm 5\%$ від номінального; в окремих випадках допускається відхилення вище номінального до $+10\%$. Зниження напруги на найвіддаленіших лампах внутрішнього робочого освітлення промислових підприємств і громадських споруд, а також прожекторних установках зовнішнього освітлення повинно бути не більше $2,5\%$ номінальної напруги ламп, а на найвіддаленіших лампах освітлення житлових споруд, аварійного освітлення і зовнішнього освітлення, яке виконано світильниками, - не більше 5% . Найбільша напруга на лампах, як правило, повинна бути не більше 105% номінальної напруги ламп. При аварійних режимах напруга на лампах не повинна зменшуватись більше ніж на 12% від номінальної напруги.

Приєднання електродвигунів та інших навантажень до магістральної електричної мережі або до виводів ТП напругою 380 В допускається за умови, коли коливання напруги при їх вмиканні не буде перевищувати $2,5\%$ номінальної напруги мережі. При кількості вмикань менше 5 разів на добу коливання напруги не обмежується.

Нормальна схема мережі - це схема електричних з'єднань, при якій обладнанню і кабельним лініям мережі задано найбільш економічний та надійний режим роботи на основі аналізу як нормальних, так і аварійних режимів, з врахуванням забезпечення нормальної напруги.

Нормальна схема розробляється і встановлюється для мережі як високої, так і низької напруги на основі результатів вимірювань. Зміна нормальної схеми мережі дозволяється лише при аварійному режимі, у випадках пошкодження, ремонту, випробування обладнання і кабельних ліній, і допускається тільки за заявками, які попередньо затверджені, на мінімальні терміни.

Стан електричних навантажень, що визначаються вимірюваннями в періоди максимальних та мінімальних навантажень, які є вирішальними для аналізу стану мережі, розробки заходів із забезпечення подальшого росту навантажень, забезпечення економічної та надійної роботи мережі.

До настання періоду вимірювань необхідно провести такі підготовчі роботи:

- скласти графік, розробити маршрути, послідовність вимірювань на зборках та інших установках мережі з врахуванням характеру навантажень та часу проходження максимуму;

- підготувати бланки і завчасно заповнити графи найменування лінії (диспетчерський номер), перерізу проводів, напруги та інше для того, щоб на місці вимірювання у вільні графи відповідно до встановленої послідовності вписувати покази приладів напроти номера лінії, для якої вимірюється навантаження;

- провести попередню перевірку вимірювальних приладів (вимірювальних кліщів та вольтметрів) в лабораторії.

Встановлена в бланку послідовність запису повинна відповідати порядку фактичного розподілу окремих приєднань РП мережі в натурі. Такою попередньою підготовкою досягається економія часу, більш висока якість вимірювань, що дуже важливо, враховуючи обмежений час проходження максимуму.

При обробці бланків перевіряється:

- час вимірювання і відповідність схеми цієї ділянки мережі в натурі;
- відповідність між навантаженнями окремих фаз та нульового проводу;

- відповідність між сумарним навантаженням силового трансформатора і складовими навантаженням підхідних магістральних ліній;
- рівень напруги залежно від встановленої відпайки трансформатора.

За результатами вимірювань і їх аналізу складаються плани із розвантаження перевантажених кабельних ліній та обладнання мережі, перерозподілення навантажень та інші заходи, які забезпечують економічну та надійну роботу кабельних ліній та міської мережі в цілому. Цей план виконується у порядку експлуатації, капітального ремонту мережі і в порядку капітального будівництва, залежно від об'єму та характеру заходу, який передбачений планом.

В окремих своїх частинах, а також для кабельних ліній цей план передбачає:

- включення в паралель живильних ліній напругою вище 1000 В, які працюють окремо, із переобладнанням захисту розподільного пункту мережі, а також магістральних та ввідних кабельних ліній до 1000 В;

- використання резервних ліній для перерозподілу навантажень і розвантаження перевантажених ділянок мережі та обладнання;

- перенесення поділок в РП мережі;

- прокладання нових живильних та розподільних ліній вище 1000 В, а також магістральних та ввідних ліній до 1000 В;

- підвищення напруги передачі, тобто переведення мережі вищої напруги 3000 на 6000 В, 6000 на 10000 В, а також мережі нижчої напруги з 127 на 220 В і з 220 на 380 В для підвищення пропускної здатності діючих кабельних ліній;

- забезпечення двостороннього живлення магістральних ліній напругою до 1000 В, які мають велике навантаження та довжину, з пристроєм ділення в точках струморозподілу;

- перерозподілення навантажень по фазах, усунення перекосів в магістральних лініях та ввідних пристроях;
- підвищення ізоляції мережі до 1000 В та ліквідації замикань на землю.

Для кожного заходу плану проводиться розрахунок втрат до та після його виконання для визначення його ефективності, величину економії потужності та енергії.

Для прикладу визначимо порівняльні втрати для лінії до та після зміни схеми живлення (рис. 3.1). Знаючи величину навантаження до та після зміни схеми, довжину та переріз кабельної лінії, знайдемо втрати потужності за формулою:

$$\Delta P = 3I_M^2 \cdot R \cdot l, \quad (3.1)$$

де I_M - величина струму, виміряна в період максимуму навантажень;
 R - опір кабелю, Ом/км;
 l - довжина кабелю, км.

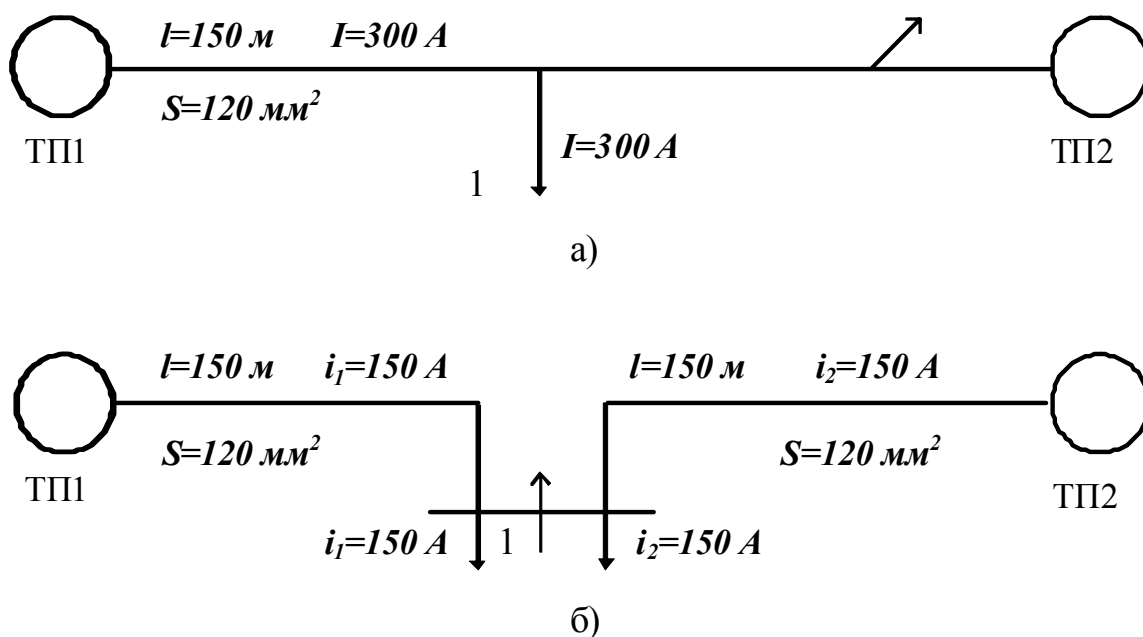


Рисунок 3.1 - Розрахункова схема ефективності струморозподілення
 а) до зміни схеми; б) після зміни схеми;

→ - ділення мережі; 1 - ввідний пристрій; l - довжина лінії, м; S - переріз мідної жили кабелю, мм^2 ; I - струм навантаження, А.

Підставляючи в формулу відомі нам величини, наведені на рис. 3.1, визначаємо втрати потужності до зміни схеми:

$$\Delta P_{\text{заг}} = 3 \cdot 300^2 \frac{18 \cdot 4 \cdot 0.150}{120} \cdot 10^{-3} = 6.2 \text{ кВт},$$

де $18 \cdot 4 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{км}$ - опір мідної струмоведучої жили кабелю при температурі $+20^\circ\text{C}$.

Втрати потужності після зміни схеми складають на ділянці ТП1 - ввідний пристрій

$$\Delta P_1 = 3 \cdot 150^2 \frac{18 \cdot 4 \cdot 0.150}{120} \cdot 10^{-3} = 1.78 \text{ кВт},$$

аналогічно на ділянці ТП2 - ввідний пристрій

$$\Delta P_2 = 3 \cdot 150^2 \frac{18 \cdot 4 \cdot 0.150}{120} \cdot 10^{-3} = 1.78 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{\text{заг}} = \Delta P_1 + P_2 = 1.78 + 1.78 = 3.56 \text{ кВт}.$$

Економія потужності дорівнює різниці втрат до та після зміни схеми й складає $6.2 - 3.56 = 2.64 \text{ кВт}$, а річний ефект $2.64 \cdot \tau = 2.64 \cdot 2500 = 6600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$, де τ - кількість годин роботи лінії за рік з втратами, які відповідають максимальному навантаженню.

Для змішаного навантаження значення коефіцієнта тривалості втрат τ береться рівним від 2500 до 3000 год.

В найбільш економічному режимі працюють кабельні лінії, які увімкнені паралельно, тому що струми навантаження між кабелями при цьому розподіляються природно, обернено пропорційно їх опорам.

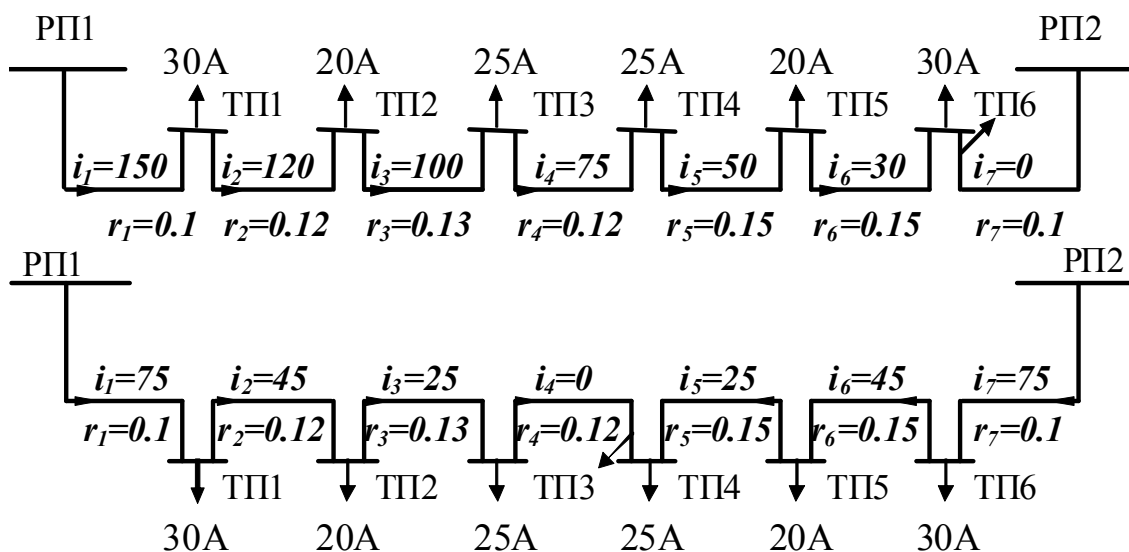


Рисунок 3.2 - Розрахункова схема для визначення втрат електроенергії залежно від місця ділення в розподільчій мережі.

i - струм навантаження, А; r - опір, Ом.

Кабельні розподільні лінії вище 1000 В в більшості міських електричних мереж можуть замикатися за допомогою існуючих ділень в точках струморозподілу на паралельну роботу, але в нормальному режимі живлення навантажень ТП розподільної мережі здійснюється окремо. Живлення електричних навантажень ряду трансформаторних підстанцій рис. 3.2 здійснюється від різних РП з пристроєм відповідного ділення мережі в точках струморозподілу або примусово за умовами надійності електропостачання.

Щоб виключити можливість замикання між собою ділянок мережі, які живляться від різних джерел по кабельних магістральних лініях до 1000 В, на стороні нижчої напруги встановлюються аналогічні “ділення”. Ефективність робіт із перерозподілення навантажень, перенесення ділень в мережі, переведення кабельних ліній і окремих ділянок мережі на підвищену напругу та інших заходів за результатами вимірювань навантажень і напруги враховуються розрахунковими формами. Мінімальні втрати в кабельних лініях відповідають мінімальному рівню відхилень напруги, сприяють підвищенню якості та економічності роботи міської мережі і тому повинні бути покладені в основу нормального режиму роботи мережі.

Мінімальні втрати потужності та енергії в розподільній мережі вище 1000 В, як і в магістральних лініях до 1000 В, при роздільному живленні можуть бути досягнуті за умови правильного вибору місця “ділення” мережі якомога ближче до точки струморозподілу, який відповідає режиму паралельної роботи.

Вищесказане легко підтверджується наведеним нижче розрахунком втрат потужності залежно від місця вибору ділення мережі. На рис. 3.2 зображена розподільна мережа між двома РП №1 та №2, яка живить ТП №1 - ТП №6, навантаження яких увімкнені зі сторони РП №1 з діленням кола в ТП №6. Навантаження окремих ліній кола електричного струму, їх опір та всі інші необхідні для розрахунку дані показані на розрахунковій схемі.

Втрати потужності за розрахунковою схемою при живленні навантажень зі сторони РП-1:

$$\Delta P_1 = 3 \sum i^2 r \cdot 10^{-3} = \\ = 3(150^2 \cdot 0.1 + 120 \cdot 0.12 + 100^2 \cdot 0.13 + 75^2 \cdot 0.12 + 50^2 \cdot 0.15 + 30^2 \cdot 0.13) = 19.33 \text{ кВт.}$$

Втрати потужності за розрахунковою схемою рис. 3.2 з пристроєм ділення в ТП на кабелі в сторону ТП3:

$$\Delta P_2 = 3 \sum i^2 r \cdot 10^{-3} = \\ = 3[(75^2 \cdot 0.1 + 45 \cdot 0.12 + 25^2 \cdot 0.13) + (75^2 \cdot 0.1 + 45^2 \cdot 0.13 + 25^2 \cdot 0.15)] = 5.07 \text{ кВт.}$$

З розрахунку видно, що в першому випадку (живлення навантажень в ТП зі сторони РП №1) втрати потужності та енергії майже в 4 рази перевищують аналогічні втрати при живленні цих самих навантажень з обох сторін (РП №1 та РП №2) з пристроєм “ділення” в ТП №4 на кабелі в сторону ТП №3 і складає величину в першому випадку:

$$\Delta P_1 \cdot \tau = 19.33 \cdot 2500 = 48325 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

а в другому:

$$\Delta P_2 \cdot \tau = 5.07 \cdot 2500 = 12675 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

Таким чином, правильний вибір місця ділення мережі з урахуванням навантажень, довжин та перерізу кабельних ліній як в мережі вищої, так і нижчої напруги має вирішальне значення для забезпечення економічної роботи міської мережі при мінімумі втрат електроенергії. При необхідності проводиться перевірка дослідним шляхом дійсно допустимого навантаження кабельної лінії за її нагрівом та коректування розрахункового навантаження в зв'язку з цим. Як нами було зазначено вище, допустимі струмові навантаження на кабельні лінії визначаються встановленими ДСТом максимальними значеннями температури нагріву струмоведучих жил кабелю.

Розрахункові умови, за якими ПУЕ встановлені допустимі навантаження на кабельні лінії, такі як: значення питомого опору ґрунту, теплового опору кабелю, а також розрахункові коефіцієнти на температуру середовища прокладання та інші, за якими експлуатаційним персоналом встановлені допустимі розрахункові навантаження на кабельні лінії, можуть змінюватись. Тому найкращим способом контролю є перевірка відповідності температури струмоведучих жил встановленим ДСТом значенням.

Оскільки безпосереднє вимірювання температури струмоведучих жил кабелю практично виконати неможливо, то в умовах експлуатації попередньо визначають температуру на свинцевій чи алюмінієвій оболонці залежно від марки кабелю, чи на броні, а потім розрахунком визначають тепловий перепад між оболонкою кабелю та струмоведучими жилами, виходячи із такого:

$$t_{\text{ж}} = t_{\text{обол}} + \Delta t_{\text{каб}}.$$

Перепад температури від оболонки до жил кабелю легко визначається розрахунком за формулою:

$$\Delta t_{\text{каб}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ж}} \cdot s_{\text{каб}},$$

де $3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{ж}}$ - величина теплового потоку чи потужність, яка переходить в тепло, що виділяється трьома струмоведучими жилами;

I - виміряна при досліді довготривала максимальна величина струму навантаження, А;

$R_{\text{ж}}$ - електричний опір 1 см струмоведучої жили, Ом;

$s_{\text{каб}}$ - тепловий опір ізоляції та захисних обмоток кабелю, Ом·см;

$t_{\text{обол}}$ - температура на свинцевій чи алюмінієвій оболонці, залежно від марки кабелю або броні, виміряна при досліді, °С.

Метод безпосереднього визначення температури оболонки кабелю має значні переваги, тому що дозволяє точно визначити дійсний тепловий опір внутрішнього середовища, який, як відомо, складає близько 65-70% загального теплового опору кабелю. Величина теплових опорів ізоляції і зовнішніх обмоток наведена в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Тепловий опір ізоляції $s_{\text{із}}$ і шару зовнішніх обмоток $s_{\text{з.п}}$ для старих (помітно висушених) трижильних кабелів 6-10 кВ (град·см/Вт)

$U_{\text{н}}$	Шар	Переріз струмоведучої жили, мм ²									
		16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
6	Ізоляція	83	73	64	58	50	42	37	32	30	30
	Зовнішня обмотка	31	30	25	24	22	20	18	18	18	17
10	Ізоляція	101	89	82	72	66	57	51	47	43	37
	Зовнішня обмотка	25	24	20	19	18	18	17	17	15	15

Для прикладу проведемо розрахунок температурного перепаду та скоректуємо встановлене розрахунком максимально допустиме навантаження на кабель типу ААБ перерізом 3×185 мм² номінальною напругою 10 кВ. Кабель прокладений в землі і знаходиться в експлуатації.

Вимірюваннями визначено: температуру алюмінієвої оболонки 40°С, довготривале максимальне навантаження 225 А. Для визначення температури перепаду і температури жил кабелю попередньо проведемо розрахунок опору 1 см жили:

$$R = \frac{s}{100}, \quad (3.2)$$

де s - питомий опір жили, рівний 0.031 Ом·мм²·см при $t = 20^\circ\text{C}$.

$$R = \frac{0.031}{100} = 0.00031 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 \cdot \text{см},$$

при температурі 60°С

$$R_{ж60}=R_{20}[1+0.004(t-20)]=0.00031[1+0.004(60-20)]=0.00036 \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{см}.$$

За табл. 3.1 знаходимо значення теплового опору ізоляції кабелю, рівне 43 град·см/Вт.

Підставляючи отримані величини, визначаємо:

$$\Delta t_{каб}=3\cdot I^2\cdot R_{ж}\cdot s_{каб}=(3\cdot 225^2\cdot 0.00036\cdot 43)/185=13\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Таким чином, температура жили становить:

$$t_{ж}=t_{обол}+3\cdot I^2\cdot R_{ж}\cdot s_{каб}=40+13=53\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

За результатами вимірювань і розрахунку температур нагріву жил кабелів $t_{ж}$ і відповідних цьому нагріву струмів навантаження I , температур навколишнього середовища $t_{вим}$, допустиме на кабель навантаження може бути зкоректованим для дійсних експлуатаційних умов за формулою:

$$I_{доп}=I\sqrt{\frac{t_{доп}-t_{вим}}{t_{ж}-t_{вим}}}=225\sqrt{\frac{60-40}{53-40}}=225\cdot 1.25=280\text{ А}.$$

Після встановлення нового допустимого навантаження на кабельну лінію необхідно провести додаткові вимірювання температури нагріву кабелю з метою перевірки правильності проведених змін струму навантаження. Теплоперепад Δt для кабелів різних конструкцій і з різним ступенем старіння може бути також визначений за допомогою номограм. Вимірювання температури нагріву оболонок кабелю необхідно проводити в місцях, де кабель працює в найважчому тепловому режимі (місця перетину з тепло- та паропроводами, в пучках діючих кабельних ліній, ділянках траси, де ґрунт сухий, має великий тепловий опір та ін.) в період максимального навантаження кабеля двічі з інтервалом в 1-2 год, якщо навантаження лінії рівномірне.

У випадку нерівномірного навантаження температуру оболонки необхідно вимірювати протягом доби одночасно з навантаженням. Для визначення температурного перепаду Δt кабелю за температуру оболонки $t_{обол}$ слід брати максимальне значення температури, а за величину струму I - максимальне навантаження лінії тривалістю не менше 2 год. Вимірювання температури оболонок кабелю проводиться за допомогою термометрів, термопар та термоопорів.

Звичайні лабораторні термометри застосовуються при вимірюванні температур оболонок кабелів, які прокладені відкрито в кабельних підвалах, колекторах, тунелях та каналах. Для створення контакту резервуар з ртуттю термометра рекомендується закріплювати до металічної оболонки кабелю за допомогою станіоля або аналогічного

матеріалу з гарною теплопровідністю. Вимірювання температур оболонок кабелів, які прокладені в землі і трубах, проводиться за допомогою термопар та термоопорів. При користуванні термопарами та термооперами важливо зберегти незмінними умови охолодження кабелів. Тому відкритий котлован після встановлення термопар або термоопорів необхідно засипати і втрамбувати тим самим ґрунтом. Вимірювання температур після встановлення термопар, термоопорів і засипання котловану слід проводити не раніше ніж через добу, тобто після відновлення нормального теплового поля навколо кабелю.

Кінці термопар опорів виводяться на стіну розташованої неподалік будівлі або вводяться в спеціально оснащений для цього контрольний колодязь. В кабельних приміщеннях (колекторах, тунелях) станцій та підстанцій останнім часом знаходять застосування засоби автоматичного записування температур оболонок кабелю за допомогою електричних потенціометрів або електричних містків (типів ЕПП-9, ЕПД-12 та ін.)

4 Навантаження кабельних ліній

4.1 Коректування припустимих навантажень контролем нагрівання кабелів

Для визначення можливості збільшення тривало припустимих навантажень кабельних ліній (КЛ) порівняно з розрахунковими, а також для контролю певних навантажень кабелів рекомендується перевіряти навантаження дослідним шляхом.

Для цього вимірюють температуру металевих оболонок кабелів, а температури жил визначаються за результатами вимірювань за формулою:

$$t_{\text{ж}} = t_{\text{об}} + \Delta T_{\text{каб}}, \quad (4.1)$$

де $\Delta T_{\text{каб}}$ - перепад температур від оболонки (або бронестрічок) до жил кабелю;

$t_{\text{об}}$ - температура на свинцевій оболонці або броні кабелю при досліді, °С.

Теплоперепад ΔT можна визначити за формулою:

$$\Delta T_{\text{каб}} = \frac{I_{\text{оп}}^2 n \rho S_{\text{к}}}{100q}, \quad (4.2)$$

де $I_{\text{оп}}$ - тривале максимальне навантаження кабелю, виміряне при досліді, А;

n - кількість жил кабелю;

ρ - питомий опір міді при температурі, близькій до температури жили $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

$S_{\text{к}}$ - сума теплових опорів ізоляції і захист оболонок кабелю, $\text{град} \cdot \text{см}/\text{Вт}$;

q - поперечний переріз жили кабелю, мм^2 .

Теплоперепад також визначають за номограмами, а для кабелів різних конструкцій і для кабелів з різним ступенем старіння визначаються:

а) для кабелів 3-10 кВ з перерозподіленою ізоляцією (виготовлених з 1941 р.) за номограмами,

б) для кабелів виготовлених до 1941 р. (з рівними товщинами поясної і фазної ізоляції), а також для кабелів, які тривалий час (більше 5 років) працювали в складних умовах, що призвело до висушування ізоляції, величини теплових опорів ($S_{\text{із}}$ та $S_{\text{н.п.}}$).

За результатами, отриманими з дослідів температур нагріву жил кабелю $T_{\text{оп}}$ та відповідних їм струмів навантаження $I_{\text{оп}}$ й температур

навколишнього середовища $T_{\text{навк}}$, припустиме навантаження коректується для дійсних експлуатаційних умов з виразу:

$$I_{\text{доп}} = I_{\text{оп}} \sqrt{\frac{T_{\text{доп}} - T_{\text{навк}}}{T_{\text{оп}} - T_{\text{навк}}}}, \quad (4.3)$$

де $T_{\text{доп}}$ - максимально допустима температура за ДСТУ.

Після коректування навантаження додатково вимірюють температуру для перевірки правильності розрахунків струмів навантаження.

Вимірювання температур кабелю доцільно проводити в несприятливих для роботи умовах: максимальне навантаження, висока температура або погана теплопровідність навколишнього середовища і т.п.

Якщо навантаження кабельної лінії протягом доби рівномірне, то температуру оболонки достатньо виміряти двічі з інтервалом 1-2 години; при нерівномірному навантаженні - через кожні 1-2 години, одночасно визначаючи величину навантаження. За отриманими даними будуються добові графіки температури оболонки кабелю, його навантаження. В цьому випадку при підрахунку температури жили кабелю за $t_{\text{об}}$ слід взяти максимальне значення температури оболонки за графіком, а за $I_{\text{оп}}$ - тривале (не менше 2 годин) максимальне значення навантаження, хоча ці значення будуть зсунуті в часі.

Вимірювання температури металевих оболонок кабелів, прокладених відкрито (в розподільних пристроях станцій та підстанцій, в тунелях, колекторах, каналах, шахтах, підвалах, колодязях та ін.), рекомендується проводити за допомогою термоопорів або термопар і тільки в окремих випадках термометрами. В останньому випадку кінець термометра з ртуттю міцно закріплюють і притискають до зовнішньої металевої оболонки за допомогою станіоля або аналогічного матеріалу з високою теплопровідністю і бандажу з кіперної або тафтяної стрічки.

При значних групових прокладаннях на відповідальних об'єктах (тунелі електростанцій, підстанцій, живильні лінії на центрах живлення) рекомендується застосовувати автоматичний запис температур за допомогою електронних потенціометрів або електронних мостів (типів ЕПП-9, ЕПД-12 та ін.).

Вимірювання температури металевої оболонки кабеля, прокладеного в землі або інших важкодоступних місцях слід виконувати за допомогою термоопорів або термопар.

На кожному кабелі в місці вимірювання слід встановити не менше двох термоопорів, що забезпечує резерв у випадку псування одного з них.

Для встановлення термоопорів (або термопар) на кабелях, прокладених в землі, необхідно:

а) викопати на трасі КЛ котлован і зробити заглиблення в одній зі стінок котловану по осі кабелю на 200-250 мм;

б) зняти в цьому місці з кабелів верхній шар джуту або розвести його;

в) закріпити термоопір на броні кабелю шляхом накладання бандажу з декількох шарів ізоляційної стрічки;

г) вивести вимірювальні кінці в сталевій трубці в зручне і безпечне від механічних пошкоджень місце;

д) встановити на кінцях виведених проводів умовні бирки;

е) засипати і обережно втрамбувати котлован так, щоб не пошкодити закладених термоопорів.

Для вимірювання температури навколишнього середовища встановлюються окремі термоопори (термопари). Температура навколишнього середовища фіксується:

а) при прокладанні кабелю в землі - на відстані 3-5 м від крайнього кабелю на глибині прокладання кабелів;

б) при прокладанні кабелів в тунелях і каналах - температура повітря на вході і виході з тунелю і т. д.

Визначене на основі дослідів дійсно припустиме навантаження кабельної лінії фіксується актом або протоколом, затвердженим головним інженером району мережі (електростанції). До протоколу додаються результати вимірювань та розрахунків, на основі яких встановлюється новий режим роботи кабельної лінії. При цьому в паспортній карті кабельної лінії повинна бути вказана нова величина тривалодопустимого навантаження.

4.2 Контроль за навантаженнями та міри покращення охолодження кабельних ліній

На відповідальних (живильних) кабельних лініях, які відходять від електростанцій та підстанцій з постійним чергуванням персоналу, контроль за навантаженнями повинен проводитись по стаціонарних вимірювальних приладах - за записами показів приладів, зробленим черговим персоналом в добовій відомості, в терміни, встановлені місцевою інструкцією. На шкалі щитових амперметрів повинен бути відмічений червоною рисою припустимий струм кабельної лінії.

В умовах мереж, де підстанції не мають постійного чергування персоналу, контроль за навантаженнями здійснюється періодично.

Вимірювання повинні проводитись 2-3 рази на рік: раз в літній період і 1-2 рази під час осінньо-зимового максимуму.

Результати вимірювань навантажень повинні систематизуватися і аналізуватися експлуатаційним персоналом згідно з місцевими інструкціями і бути основою для проведення заходів, які забезпечують економічну та безаварійну роботу кабельних ліній.

Контроль за температурами ґрунту в місцях перетину кабелів з теплопроводами, а також температурами оболонок КЛ проводиться в терміни, встановлені місцевими інструкціями.

Температури навколишнього середовища для місцевих умов, за якими встановлюються сезонні навантаження КЛ, рекомендується вимірювати автоматично, шляхом безперервного (або періодичного) записування їх за допомогою електронних потенціометрів.

Якщо в результаті випробувань і перевірок виявиться, що температура жил кабелів вища за припустиму або виявляться ділянки з незадовільними умовами охолодження, то рекомендується використання таких заходів:

- а) покращення вентиляції в тунелях та каналах;
- б) влаштування тунелів і каналів хоча б найпростіших типів і заміна ними траншейних прокладень з великою кількістю завантажених КЛ;
- в) застосування вставок кабелів великого перерізу;
- г) застосування додаткової теплоізоляції теплопроводів в місцях перетину їх з кабелями;
- д) перепрокладання кабелів в траншеях і збільшення відстані між ними для зменшення взаємного теплового впливу;
- е) засипання траншей теплопровіднішим ґрунтом.

5 Блукаючі струми, їх вимірювання та способи захисту металевих оболонок кабельних ліній від корозії

Надійність роботи кабельних ліній визначається станом і герметичністю захисних оболонок кабелю. Порушення герметичності оболонок, проникання повітря та вологи у внутрішні порожнини кабелю призводить до електричного пробоя ізоляції і пошкодження кабельної лінії. Металеві оболонки кабельних ліній, які прокладені в землі, піддаються небезпеці руйнування в результаті електролітичної корозії, яка викликана блукаючими струмами, а також ґрунтової - електрохімічної корозії. Джерелами блукаючих струмів є трамвай, метрополітен і електрифікований на постійному струмі приміський рейковий транспорт. Як відомо, провід (тролей) в цих установках з'єднується з плюсом джерела постійного струму, а мінус - із зворотним проводом, яким є рейкові шляхи.

Внаслідок слабкої ізоляції полотна дороги від землі, великого омичного опору рейкових шляхів, порушення контакту рейок частина струму проходить до мінуса джерела живлення по землі. Зустрічаючи на своєму шляху провідник, яким є металеві оболонки кабельних ліній, трубопроводи і інші підземні споруди, блукаючі струми можуть пройти по цьому провіднику, а потім вийти з нього, щоб повернутись до негативного полюсу тягової підстанції. В цьому колі електричного струму, яке складається з рейкового шляху (джерела), металевих оболонок кабелю та землі, має місце явище електролізу. Рейковий шлях і металеві оболонки кабельних ліній є при цьому електродами (анодом та катодом), а навколишній ґрунт, де завжди присутня волога, яка містить певну кількість різних солей та кислот, - електролітним середовищем або електролітом.

Як відомо, при проходженні постійного струму через електрод електрод з вищим потенціалом (анод) розчиняється. В місці переходу електричного струму з рейок в кабель вищий потенціал буде мати рейка, тому вона виступає анодом, а оболонки кабелю - катодом. Ділянка, де блукаючі струми відходять від рейкових шляхів і через землю переходять на металеву оболонку кабельних ліній, називається катодною зоною. В цьому випадку оболонкам кабельних ліній небезпека руйнування не загрожує.

Зовсім інша справа в місці, де блукаючі струми переходять з металевих оболонок кабельних ліній в землю. Потенціал оболонок кабелю в даному випадку буде вищим за потенціал землі (анодна зона). В анодній зоні металеві оболонки кабельних ліній будуть руйнуватися. Кількість металу, який розчиняється в анодній зоні, за законом Фарадея пропорційна величині блукаючого струму, часу, протягом якого він проходить, і залежить від роду металу, з якого виконані оболонки кабельних ліній.

Відповідно до розрахунків, при величині блукаючого струму 1 А втрати за рік складають 33 кг свинцю, 3.95 кг алюмінію і 9 кг заліза.

Найбільш інтенсивному руйнуванню, таким чином, підлягає свинцева оболонка кабельних ліній.

Для захисту металевих оболонок кабельних ліній інших підземних споруд від електролітичної корозії блукаючими струмами необхідно, щоб з боку організації, яка експлуатує електрифікований транспорт, було вжито спеціальних заходів. До таких заходів відносяться максимальне зменшення поздовжнього омичного опору рейкового шляху, що досягається за рахунок зварювання рейок, і підвищення перехідного опору для струму від рейок до землі шляхом ізоляції рейок від землі. Цими заходами досягається зменшення величини блукаючого струму, який відходить від рейок, а відповідно і зменшення небезпеки руйнування металевих оболонок та пошкодження кабельних ліній. Окрім вказаних вище заходів, для зменшення спаду напруги в рейках застосовуються відсмоктуючі лінії, які являють собою одножильний ізольований кабель, що з'єднує різні точки рейкового шляху безпосередньо з шиною тягової підстанції. При такому влаштуванні тягові струмові навантаження повертаються на підстанцію не по рейковій мережі, а спеціальним ізольованим одножильним кабелем великого перерізу, чим досягається значне розвантаження рейкової мережі, і відповідно зниження величини блукаючих струмів.

Правилами технічної експлуатації електричних станцій і мереж на персонал, який обслуговує кабельні мережі, покладається обов'язок проведення систематичного контролю виконання управліннями та службами міського трамваю, метрополітену та електрифікованих залізничних шляхів заходів щодо зменшення величин блукаючих струмів в землі відповідно до вимог "Правил захисту підземних металічних споруд від корозії" СН266-63.

Для визначення корозійної небезпеки і розроблення на основі вимірювань блукаючих струмів необхідних для захисту кабельних ліній заходів повинна бути складена і періодично коректуватись потенціальна діаграма кабельної мережі або її окремих ділянок. З цією метою попередньо на планах міста, де нанесені кабельні лінії і споруди кабельної мережі (РП, ТП, СП), наносяться рейкові шляхи трамваю, відсмоктуючі кабелі та контрольно - вимірювальні пункти, а також тягові підстанції, які живлять електроенергією тягову мережу.

За результатами аналізу контрольних вимірювань з діаграми потенціалів рейкової мережі, яка складається та коректується персоналом, що обслуговує тягову мережу, а також за даними про випадки пошкодження кабелів та інших підземних споруд встановлюються місця, де повинні проводитись вимірювання блукаючих струмів на кабельних лініях. Як показує досвід, найнебезпечнішими зонами, де в першу чергу необхідно встановити нагляд за станом металевих оболонок кабельних ліній, є: місця розміщення трамвайних підстанцій; відсмоктуючі пункти трамваю; місця зближення та перетину кабельних ліній з трамвайними шляхами.

В об'єм і комплекс вимірювань на кабельних лініях для оцінки небезпечності корозії входять такі вимірювання:

- різниці потенціалів оболонок кабелю відносно землі;
- різниці потенціалів між оболонками кабелів, рейками трамваю або іншими підземними спорудами;
- поверхневої густини струму, який сходить з оболонок кабелю в землю;
- величини та напрямку струму, який проходить по оболонках кабелю.

Вимірювання різниці потенціалів виявляють наявність блукаючих струмів і їх напрямки для виявлення анодних зон, де оболонки кабелів мають позитивний потенціал відносно землі. Як свідчить досвід, потенціали величиною 0.1 - 0.2 В в анодній зоні достатні, щоб викликати руйнування свинцевої оболонки, а відповідно пошкодження кабельної лінії. Густина стікаючого струму є також важливим показником, який вказує на наявність в металевих оболонках кабелю процесу електролітичної корозії. Для кабелів, які прокладені в землі, небезпечною вважається густина струму, який стікає в землю (анодна зона), більша 0.15 мА/дм^2 .

Способи вимірювання потенціалу оболонок кабелю відносно землі, а також густини струму, який стікає в землю в анодній зоні, викладені в розд. 5 - Інструкції з експлуатації силових кабельних ліній. Щоб встановити максимальне значення блукаючих струмів, вимірювання слід проводити в години найінтенсивнішого руху електрифікованого транспорту.

Попередні вимірювання з метою виявлення блукаючих струмів на оболонках кабельних ліній, які прокладені в землі, враховуючи складність проведення робіт із демонтажу дорогого удосконаленого дорожнього покриття, можна проводити з трансформаторних пунктів, які розміщені в зоні електрифікованих шляхів, тягових підстанцій та ремонтних депо. Вимірювальні прилади при цьому вмикаються одним полюсом до контуру заземлення, з яким металеві оболонки кабельних ліній з'єднані електрично, а другим полюсом - до заземлювача (кілок заземлення), який монтується в землі на відстані 7-10 м від ТП. В інших випадках для вимірювання блукаючих струмів розкопуються спеціальні невеликі котловани довжиною 1 м і шириною 0.7 м, через 100-300 м по трасі ліній, яка досліджується. Вимірювання блукаючих струмів на кабельних лініях, які прокладені в блочній каналізації, проводяться в кожному оглядовому колодязі траси, яка досліджується, і де розміщені з'єднувальні муфти.

За результатами вимірювань організація, яка експлуатує кабельні лінії, проводить такі заходи:

- а) проводить виявлення зон, які є небезпечними для кабельних ліній відносно електричної корозії і складає карту анодних зон;

б) організовує спостереження за станом кабельних ліній шляхом проведення систематичних вимірювань в контрольних пунктах;

в) робить аналіз причин пошкоджуваності кабельних ліній при профілактичних випробуваннях і в роботі, а також виявляє випадки пошкодження кабельних ліній внаслідок корозії;

г) проводить монтаж ізолюючих муфт з епоксидного компаунду у випадку необхідності для розриву кола блукаючого струму по металічних оболонках кабельної лінії.

Зокрема, на всіх кабелях, які виходять за межі спорудження метрополітену, повинні бути встановлені ізолюючі муфти, які перешкоджають перенесенню потенціалу і блукаючих струмів по оболонках кабелів;

д) робить з'єднання металевих оболонок кабельних ліній між собою з метою зменшення густини блукаючого струму.

Для захисту кабелів від блукаючих струмів та зниження позитивних потенціалів на оболонках кабелів застосовують також такі способи:

- електричного дренажу, який являє собою відведення блукаючих струмів з оболонок кабелю до джерела (рейки або безпосередньо негативні шини трамвайної підстанції);

- катодної поляризації, при якій захист здійснюється тим, що на металеві оболонки кабельних ліній подається негативний потенціал від стороннього джерела струму;

- протекторного захисту, який заключається у використанні металу (цинк, магній та ін.), який має в даному корозійному середовищі більш негативний електрохімічний потенціал, ніж потенціал металевих оболонок кабелю, і здатний при розкладанні генерувати електричний струм.

Металеві оболонки кабельних ліній, які прокладені в землі, також піддаються небезпечності руйнування діючими на них речовинами, які знаходяться в ґрунті, в результаті так званої електрохімічної корозії. Інтенсивність руйнування оболонок в цьому випадку залежить від складу ґрунту, доступу вологи та повітря (аерації). Кислі болотисті ґрунти і солончаки, продукти перегнивання, луги, вапно, хлориди, наявність яких є результатом завалення траси лінії будівельним сміттям, яке містить вапно, золу, шлак, а також розміщення траси кабельних ліній поблизу вапняних ям створюють сприятливі умови для найбільш інтенсивної ґрунтової корозії металічних оболонок.

Ступінь корозійної активності ґрунтів відносно залізної броні кабелів можна оцінювати залежно від їх питомого опору (Ом·м): більше 100 - вважається низькою, від 100 до 20 - середньою, від 20 до 10 - підвищеною, від 10 до 5 - високою і менше 5 - надто високою.

Для лабораторного дослідження корозійних властивостей ґрунту проводиться відбір проб ґрунту в місцях:

- де є підозра на агресивність властивостей ґрунту;

- де спостерігається руйнування оболонок кабелів корозією (особливо там, де відсутні блукаючі струми);

- на трасах кабельних ліній, які заново покладаються.

Відбір проб виконується в кількості 1 кг, причому 70% цієї проби береться з глибини прокладання кабелю і по 15% зі стінок шурфа або траншеї. Всі три частини перемішуються і опускаються в закриту пронумеровану тару, яка не допускає забруднення проби.

Ступінь корозійної активності ґрунтів по відношенню до свинцевої оболонки оцінюється шляхом порівняння даних аналізу проби ґрунту з величинами, наведеними в табл. 5.1.

Для припинення руйнування металевих оболонок в результаті ґрунтової корозії необхідно:

- забезпечити правильний вибір траси прокладання в процесі проектування кабельної лінії;

- не допускати забруднення траси кабельних ліній різними видами викидів та відходів, які руйнують металеві оболонки кабелів;

- при необхідності на діючих трасах кабельних ліній провести заміну ґрунту на хімічно нейтральний відносно оболонок кабелів;

- перекласти кабелі із зон, які містять агресивні ґрунти, в іншу трасу, з неагресивним середовищем;

- прокласти кабельні лінії в ізолюючих трубах, кабельному приміщенні, тунелі, колекторі;

- прокласти на ділянці, де металеві оболонки кабельних ліній руйнуються ґрунтовою корозією, кабелі спеціальних конструкцій, зі спеціальним антикорозійним покриттям, або кабелі в пластмасовій оболонці.

Таблиця 5.1 - Корозійна активність ґрунтів залежно від їх хімічного складу

Характерні ґрунти	Показники корозійної активності			Ступінь корозійності
	кількість органічних речовин (гумусу), %	концентрація водневих іонів (значення pH)	кількість азотних речовин (нітратів), %	
Піщані, піщано-глинисті	Не більше 1	В інтервалі 6,5-7,5	Не більше 0,0001	низька
Глинисті, солончакові, вапнові, слабо чорноземні	Від 1 до 1,5	В інтервалах 5 та 7,5 до 9	Від 0,0001 до 0,001	середня
Сильно чорноземні, торф'яні ґрунти, забруднені сторон. речовинами	Більше 1,5	Менше 5 і більше 9	Більше 0,001	висока

Для контролю стану металевих оболонок на суміщеному плані кабельних ліній та інших підземних споруд, а також рейкової мережі, де нанесено анодні і катодні зони, які виявлені вимірюваннями, відмічаються також ділянки і траси кабельних ліній з агресивними ґрунтами. Оцінка небезпеки як ґрунтової - електрохімічної, так і від блукаючих струмів електрифікованого транспорту - електролітичної корозії проводиться на основі вказаних вище способів вимірювання різниці потенціалів, значення, напрямку і поверхневої густини струму, який стікає з оболонок кабелю на землю.

Результати досліджень пошкоджень кабельних ліній при профілактичних випробуваннях або роботі, які проводяться на кабелях в процесі ремонту, дозволяє встановити причину руйнування кабельної лінії за характерними ознаками, властивими корозії.

6 Порядок з'ясування причин пошкодження

Місце пробою КЛ (при аварії або під час випробувань) повинно бути досліджене, і повинна бути виявлена причина пробою. Обстеження являє собою розбирання, огляд і проведення замірів ушкодженого зразка кабелю (або кабельної муфти). Результати обстежень і висновки про причину пошкоджень повинні бути оформлені протоколом.

При розрізанні і розбиранні визначаються основні конструктивні розміри кабелю (або муфти) і їх відповідність стандартам, технічним умовам (або єдиній документації на монтаж муфт).

Особливо важливо встановити товщину свинцевої оболонки, поясної і фазної ізоляції, переріз жил, дотримання розмірів і правильність накладання ізоляції в муфтах, якості складників, що заливаються.

При розрізанні зразків кабелів необхідно встановити однорідність їх виготовлення, наявність заводських дефектів і ступінь старіння кабелів.

При оглядах свинцевої (або алюмінієвої) оболонки слід звернути увагу на rischi та вм'ятини, перекручування і затяжку, тріщини та розходження шва оболонки, на наявність механічних і корозійних пошкоджень.

При огляді ізоляції встановлюється кількість збігів паперових стрічок, що мають надриви, розриви, складки і тріщини, ступінь просочення ізоляції, сухість ізоляції і розкладання просочувального складу, наявність слідів іонізації.

При оглядах жил звертають увагу на наявність задирок, гострих країв, випуклість і западання окремих дротів, обрив дротів. Припустимість неоднорідності і заводських дефектів визначається вимогами ДСТУ і технічних умов.

При наявності в кабелі заводських дефектів викликають представника заводу-постачальника. Матеріали про виявленні дефекти з додатками технічної документації передаються в ОРГРЕС.

Якщо для ремонту лінії після пробою не потрібно вирізати пошкоджену ділянку, то аналіз причин пошкоджень проводять на місці ремонту. В інших випадках надсилають зразок в кабельну лабораторію для виявлення причин пошкодження. Експлуатуюча організація веде облік всіх пошкоджень, що виявлені при роботі і при випробуваннях.

Характерні зразки кабелю з різними пошкодженнями і заводськими дефектами зберігають в лабораторії як наочні посібники при навчанні персоналу, для подання їх експертам (при поданні рекламаций, в різного роду арбітражних справах і т. п.). Результати випробувань КЛ, причини їх пошкоджень і виконані заходи ремонтів повинні заноситись в паспорт КЛ.

На підставі цих матеріалів щорічно головним інженером кабельної мережі (району, начальником електроцеху) повинен бути виконаний аналіз результатів профілактичних випробувань і причин пошкоджень КЛ і розроблений план попереджувальних заходів.

7 Визначення місць пошкоджень на кабельних лініях

7.1 Види пошкоджень кабельних ліній

Пошкодження кабельних ліній можна розділити на дві групи – аварійні і отримані в результаті дослідів підвищеної напруги. До першої групи за характером пошкоджень відносяться:

а) однофазні замикання на землю в результаті електричного пробоя при робочій напрузі; вони можуть бути двох видів – стійкі і нестійкі. Стійкі замикання, які утримуються достатньо тривалий час у робочій мережі з компенсованою нейтраллю відключаються ("від руки") черговим персоналом за показниками земляної сигналізації, характеризуються дуже малим перехідним опором фаза – земля внаслідок приварювання жили до оболонки емнісним струмом (імпульс перехідного емнісного струму до вступу в дію дугогасильного реактора може досягати декількох тисяч ампер при тривалості 5-10 мс і повторюватися неодноразово до тих пір, поки не відбудеться приварювання чи автоматичне відключення внаслідок пропалювання ізоляції непошкодженої фази і переходу в коротке замикання). Як правило, стійке замикання на землю має місце при електричному пробойі в цілому місці кабелю, а іноді і при прямому його механічному пошкодженні. Нестійкі замикання (запливаючі пробойі), що характеризуються періодичною появою "землі", після відключення пошкодженої лінії легко переводяться в стійкі з малим перехідним опором замикання шляхом допалу високовольтною випробувальною установкою; виключенням є пошкодження у воді і іноді в сполучених муфтах, що дають запливаючий пробой;

б) усі види коротких замикань – дво- і трифазні, що супроводжуються замиканням на землю;

в) розтяжки однієї чи більше фаз без замикання чи з замиканням однієї фази.

Розтяжки найчастіше виникають в з'єднувальних муфтах 0,4 і муфтах 6-10 кВ спарених кабелів, коли один з кабелів бере на себе навантаження другого, що має розтяжку. Розтяжка спарених кабелів виявляється при відключенні одного з них чи за несиметрією струмів навантаження. Часто застосовується на практиці паралельне з'єднання вторинних обмоток трансформаторів нульової послідовності, що не дозволяє знайти такі розтяжки.

Друга група – пошкодження, виявлені профілактичними випробуваннями високої напруги. Спочатку усі ці пошкодження характеризуються високим перехідним опором, звичайно легко понижувальним допалом постійним струмом. Відносно рідко виникають випадки запливаючого пробоя, допалювати які не слід.

Перед початком вимірювань проводиться визначення характеру пошкодження мегомметром з обох кінців лінії і, якщо це не вдається, - за

допомогою високовольтної випробувальної установки, після цього вибирається метод пошуку місця пошкодження. Методи вимірювань підрозділяються на дві групи: відносні, що дають відстань пошкодження від місця вимірювань, і абсолютні, що дозволяють знайти місце ушкодження безпосередньо на трасі.

Відносні методи мають помітну похибку, яка в силу ряду причин – неоднорідності кабельної лінії, власні похибки приладів і інших – не може бути менше 2% і найчастіше набагато вище. Внаслідок цього майже завжди потребує уточнення місце пошкодження на трасі.

Використання тільки другої групи методів значно збільшує трудомісткість на довгих лініях, а в деяких випадках вони не застосовуються зовсім, наприклад при запливаючих пробоях. Раціонально співставити два методи пошуку місць пошкоджень – відносний і абсолютний залежно від характеру пошкодження, довжини траси і конструкції кабелю.

7.2 Структура системи пошуку місць пошкоджень

Різноманітність видів та характеру пошкоджень, а також структури та умов роботи електричних мереж не дозволяє отримати універсальний метод визначення місця пошкодження (ВМП). Ще складніше створити універсальну апаратуру. Система ВМП містить 4 послідовні операції:

- визначення пошкодженого елемента;
- пропалювання ізоляції в місці пошкодження;
- дистанційне ВМП;
- топографічне ВМП.

Виділення пошкодженого елемента в багатьох випадках здійснюється автоматично при спрацюванні селективного релейного захисту.

Друга операція системи ВМП – пропалювання. Використання цієї операції викликано тим, що багато методів ВМП застосовуються тільки при перехідному опорі в місці пошкодження ізоляції не більше одиниць Ом. Зменшити перехідний опір – задача пропалювання. Для цього застосовуються пропалювальні установки, вартість яких є визначальною для всього пересувного комплексу засобів ВМП КЛ.

Загальними вимогами до ВМП є швидкість та точність. Швидше можна провести дистанційне ВМП, яке заключається в визначенні відстані до місця пошкодження від кінця лінії. Однак будь-яке дистанційне ВМП характеризується обмеженою точністю з таких причин:

- відстані до характерних точок траси кабельної лінії (поворотів, з'єднувальних муфт) в документації вказуються на планах, тобто в горизонтальній площині. В дійсності кабельна лінія змінює своє положення і по вертикалі, що не відображається в документації;
- кабель прокладається в траншеї без натягу (змійкою). Ступінь

подовження за рахунок такого прокладання врахувати неможливо.

Тому точність цих методів не перевищує 1 – 2 %. Для кабельної лінії довжиною $L = 3000$ м абсолютна похибка складає $\pm (30-60)$ м. В умовах асфальтобетонних покриттів розкопування ділянки протяжністю 30-60 м недопустиме, воно не повинно перевищувати ± 3 м. Таким чином дистанційне ВМП вказує фактично не місце пошкодження, а зону його розташування. Вимоги точності дистанційні методи задовольняють лише на лініях з $L < 100$ м. Топографічні ВМП – це визначення шуканого місця на трасі, тобто топографічної точки розташування місця пошкодження. Точність сучасних топографічних методів для кабельної лінії не нижче ± 3 м, але вони не задовольняють вимоги швидкості ВМП. Таким чином, кожне пошкодження визначається спочатку дистанційно, а потім топографічно.

Методи ВМП поділяються на:

- 1) дистанційні і топографічні;
- 2) високочастотні і топографічні.

Остання класифікація пов'язана з принциповою різницею електричних процесів в кабельній лінії в різних частотних діапазонах. Під низькочастотним діапазоном розуміють діапазон частот $0 \div 10$ кГц, під високочастотним - $60 \div 10^6$ кГц.

7.3 Попереднє визначення виду пошкодження кабельної лінії

На даний час для визначення місця пошкодження силових кабельних ліній використовують пересувні вимірювальні лабораторії з набором стаціонарно розміщеного обладнання і переносних приладів. Перелік обладнання та приладів, необхідних для визначення місця пошкодження силових кабелів, вказані в розділі 15.

Після виконання всіх заходів безпеки при роботах на кабельних лініях приступають до визначення виду пошкодження. За допомогою омметра та мегомметра на розземленому кабелі виконують вимірювання опору ізоляції між жилами; між кожною жилою і оболонкою кабелю. Даними приладами виявляють однофазне і міжфазне пошкодження з опором в місці дефекту від нуля до сотень кілоом. При великому опорі часто не вдається визначити вид пошкодження вказаними приладами, тоді використовують високовольтну установку. Почергово досліджуючи всі три жили кабельної лінії випрямленою напругою постійного струму відносно оболонки кабелю, виявляють вид дефекту кабелю.

Таким способом виявляють пошкодження виду: "запливаючий пробій", однофазні і міжфазні, розриви (розтяжки) кабелю, пошкодження в кінцевих воронках.

8 Вимірювання електричного опору металевих елементів конструкції кабелів

8.1 Вимірювання електричного опору за допомогою мостів постійного струму

Вимірювання електричного опору металевих елементів конструкції кабелю проводяться за ГОСТ 7229-76 при постійному струмі. При цьому вимірювання відрізняються простотою і підвищеною точністю.

Температура виробу при вимірюваннях звичайно має бути визначена з похибкою не більше $\pm 2^\circ\text{C}$. Кабелі великого діаметра перед вимірюванням електричного опору його елементів мають бути витримані при температурі, в умовах якої проводять вимірювання, кілька годин, а барабани з кабелем – кілька діб.

Якщо температура T при вимірюваннях відрізняється від 20°C , то після вимірювань проводиться перерахування опору на температуру 20°C :

$$R_{20} = \frac{R_T}{1 + \overline{\text{TK}}\rho(T - 20)}, \quad (8.1)$$

де $\overline{\text{TK}}\rho$ – середній температурний коефіцієнт опору. Попередньо перед вимірюванням необхідно визначити очікуване значення опору із таблиць стандартів або шляхом попереднього розрахунку

$$R_{20} = k\rho l/S, \quad (8.2)$$

де l – довжина зразка;
 S – переріз жили;
 ρ – питомий електричний опір металу;
 k – коефіцієнт, що враховує вплив скрутки дротів у жилі ($k \approx 1,02 - 1,03$).

Чисельні значення ρ і $\overline{\text{TK}}\rho$ наведені в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 - Питомий електричний опір і температурний коефіцієнт опору металів

Метал	ρ , мкОм·м	$\overline{\text{TK}}\rho$, 10^{-3} K^{-1}
Мідь відпалена ММ	0,01724	3,93
Мідь тверда МТ	0,0177 – 0,018	3,81
Алюміній м'який АМ	0,028	4,03
Алюміній твердий АТ	0,0283	
Сталь м'яка	0,1	6,2
Манганін, константан	0,42 – 0,52	0,01

Якщо опір зразка більший 2 Ом, то вимірювання можуть проводитися за схемою двозатискачевого моста (рисунок 8.1). У діапазоні 10–0,1 Ом застосовують схему чотиризатискачевого одинарного моста (рисунок 8.2). Якщо опір зразка менший 0,1 Ом, то застосовують тільки подвійний міст. При опорі менше 100 Ом застосовують схему подвійного моста (рисунок 8.3).

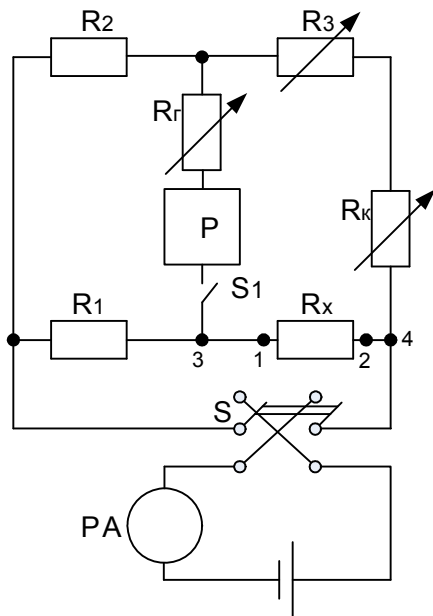


Рисунок 8.1 - Схема з мостом при двозатискачевому приєднанні зразка

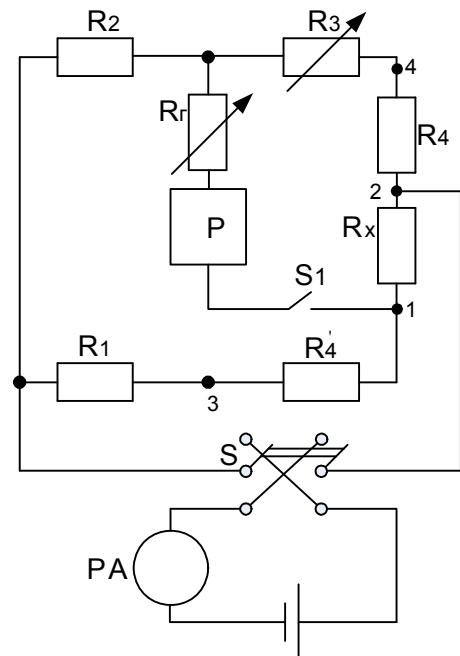


Рисунок 8.2 - Схема з мостом при чотиризатискачевому приєднанні зразка

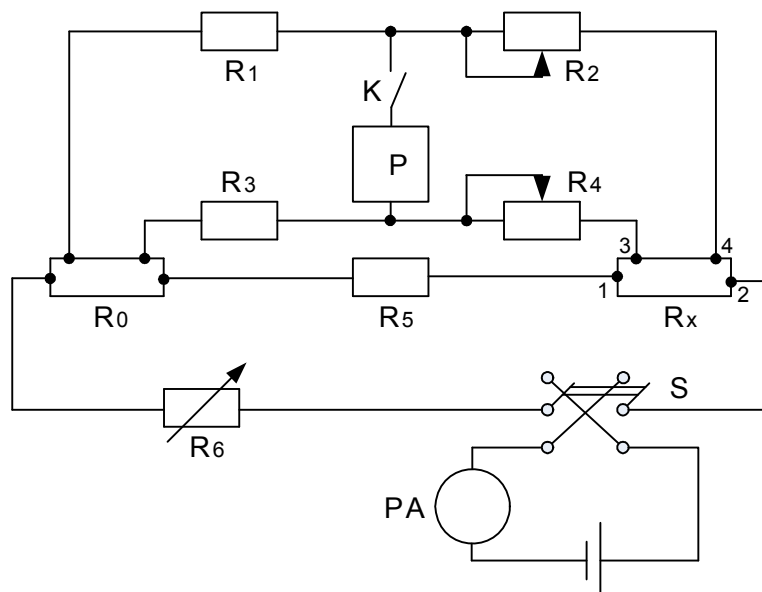


Рисунок 8.3 - Схема з подвійним мостом

У схемі двозатискачевого моста зразок підключається до проводів у точках 1 і 2. Підвідні проводи підключаються до приладу в точках 3 і 4. Опір підвідних проводів можна врахувати, якщо його виміряти при замиканні затискачів 7 і 2. Для компенсації опору підвідних проводів можна використовувати додатковий регульований опір.

При вимірюванні за схемою рисунка 8.2 опори R_4 і R'_4 двох з'єднувальних провідників входять в опори плечей моста і додаються до опорів R_1 і R_3 , які набагато більші опорів R_4 і R'_4 .

Однак усі способи вимірювання опору не можуть врахувати впливу контактних опорів у точках 7 і 2. При вимірюваннях за схемою подвійного моста (рисунок 8.3) контактні опори в точках 7 і 2 (струмові затискачі) не входять у вимірювану ділянку опору, що розташована між потенційними затискачами 3 і 4. Контактні опори в точках 3 і 4 малі порівняно з опорами R_2 і R_4 і тому вносять значну похибку в результати вимірювань. Така ж схема застосована і для підключення зразкового опору R_0 .

Клас точності застосовуваних приладів має бути не нижчий 1,5. Чутливість схеми має бути такою, щоб зміні опору плеча (R_2 , R_4 чи R_3) на 1,5% відповідало відхилення покажчика індикатора рівноваги P на одну поділку шкали. Вимірювання проводяться при двох напрямках струму, змінюваного за допомогою перемикача.

Для розрахунку опору зразка застосовуються формули

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3; \quad (8.3)$$

$$R_x = R_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (8.4)$$

Формула (8.4) справедлива тільки при виконанні умов $R_1 = R_3$ і $R_2 = R_4$. Оскільки ці умови виконуються з певними допущеннями, то похибка формули тим менша, чим менший опір з'єднувального проводу R_5 . Опори $R_2 = R_4$ виконані у вигляді декадних магазинів опорів. Для розширення діапазону вимірювань опори R_1 і R_3 змінюються ступенево.

Чутливість подвійного моста нижча, ніж мостів за схемами рис. 8.1 і 8.2, тому індикатор рівноваги P (гальванометр) подвійних мостів повинен мати найбільшу чутливість. Чутливість подвійного моста найбільша, коли значення опорів R_0 і R_x близькі. При збільшенні струму при вимірюваннях чутливість підвищується, однак щоб уникнути додаткового підігрівання жили струмом останній має бути принаймні в 10 разів менший припустимого струму навантаження для даного кабелю.

При вимірюваннях перемикач K включається тільки після проведення всіх інших переключень у схемі. При відключенні приладу він виключається в першу чергу.

При вимірюванні опору багатопроводових жил для зменшення додаткового опору в області контактів, обумовленого нерівномірним розтіканням струму, кожний провід має бути припаяний до наконечників.

8.2 Визначення місця ушкодження в кабелі за допомогою вимірювання опору жил

Цей метод застосовується, якщо ушкодження полягає в тому, що у певному місці кабелю одна з жил замикається на іншу жилу чи оболонку через перехідний опір R_{π} і якщо цей опір не перевищує 10^4 Ом.

Жилу 3, ізоляція якої ушкоджена, замикають на дальньому кінці кабелю на жилу 2 такого ж перерізу (рис. 8.4). Припустимо, у місці ушкодження жила 3 з'єднується з оболонкою 4 (чи іншою жилою) через опір R_{π} . Клеми моста підключаються до точок А і С схеми, наведеної на рисунку 8.4. Джерело живлення підключається безпосередньо до оболонки або до жили 4 чи заземлюється, якщо оболонка 4 заземлена.

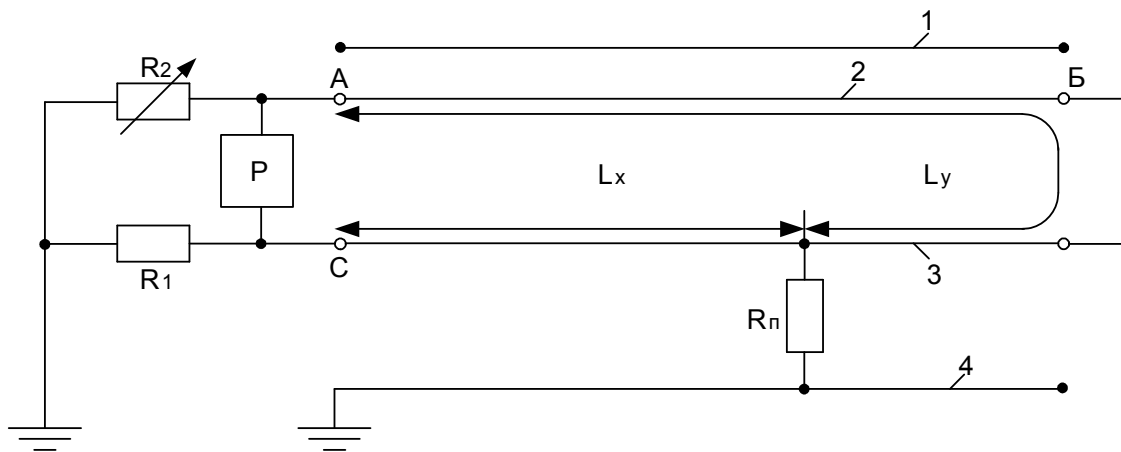


Рисунок 8.4 - Схема вимірювань для визначення відстані до місця ушкодження в кабелі:

1, 2, 3 – жили кабелю; 4 – оболонка кабелю; P – індикатор рівноваги (гальванометр)

Оскільки опори відрізків L_x і L_y пропорційні довжині відповідних ділянок жил, то з умови рівноваги моста можна записати

$$(8.5) \quad \frac{R_y + R_x}{R_x} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = \frac{2L}{L_x},$$

звідки для відстані L_x від місця ушкодження до початку А кабельної лінії одержимо

$$L_x = 2L \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

(8.6)

Вимірювання необхідно виконувати двічі, змінюючи на мосту місця кінців кабелю. При цьому одержимо

$$L_y = 2LR'_1/(R'_1 + R'_2), \quad (8.7)$$

де R'_1 і R'_2 – опори моста при другому вимірюванні.

При правильних вимірюваннях має виконуватись рівність $L_x + L_y = 2L$. Слід при можливості виконувати також вимірювання з протилежного кінця кабелю - Б.

При збільшенні R_n чутливість методу знижується. Для зменшення R_n можна провести додаткове пропалювання місця ушкодження методом додаткового випробування на пробій напругою.

Параметри мостів для вимірювання електричних опорів при постійному струмі наведені в таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 - Параметри мостів

Тип приладу	Діапазон вимірюваних опорів, Ом	Клас точності, %
Автоматичний цифровий ЦЦ34	$10^{-3} - 10^9$	0,05 – 0,5
Одинарний дво- чи чотирихвильовий міст Р369	$10^{-4} - 10^{10}$	0,005 – 2
Одинарний чи подвійний міст Р3009	$10^{-8} - 10^{10}$	0,01 – 1
Одинарний міст Р4056	$10^{-2} - 10^{15}$	0,01 – 10
Міст кабельний КМ-61 С	$0,1 - 10^5$	1
Міст кабельний Р333	$5 \times 10^{-3} - 10^5$	0,5; 1; 5

9 Вимірювання електричного опору ізоляції кабелів і проводів

9.1 Загальні відомості

Якщо до вимірюваного зразка прикласти постійну напругу, то в перший момент після підключення напруги в колі буде протікати струм, обумовлений електричною ємністю зразка (чи процесами швидкої поляризації). Потім струм з часом зменшується і досягає в остаточному підсумку постійного значення. Цей струм називають струмом, обумовленим наскрізною провідністю.

Залежність струму від часу можна подати у вигляді суми експонент

$$I = I_{\text{ск}} + \sum_{i=1}^{\infty} I_i e^{-t/\tau_i}, \quad (9.1)$$

де I_i і τ_i – постійні величини.

Величину τ_i називають постійною часу, що відповідає експонентній складовій. У більш загальному вигляді функцію (9.1) можна записати так:

$$I = \int_0^{\infty} I(\tau) e^{-t/\tau} d\tau, \quad (9.2)$$

де $I(\tau)$ – щільність розподілу I за τ .

Струм, поданий у вигляді суми експонент у (9.1), називають струмом абсорбції. Струми абсорбції обумовлені нагромадженням об'ємних зарядів на неоднорідностях у діелектриках. У стандартизованих методиках вимірювання нормується час з моменту підключення напруги до моменту початку відліку показань вимірювального приладу. Таким чином, проводиться вимірювання деякої умовної величини для даної методики. Для визначення наскрізної провідності необхідний дуже тривалий час при вимірюваннях.

Іноді подають (9.1) у вигляді суми обмеженої кількості експонент (наприклад, три) і по кривих струму абсорбції шляхом розрахунків визначають кожен доданок у сумі. За зміною цих доданків можна судити про якість ізоляції і якість технологічного процесу її обробки, наприклад сушіння, поліконденсації. Абсолютне значення струмів абсорбції також може характеризувати якість ізоляції.

При вимірюванні характеристик електроізоляційних матеріалів звичайно застосовують зразки у вигляді пластин, на які наносять три електроди. Розміри електродів регламентуються стандартами (звичайно $d_1 = 100$ мм). При вимірюваннях питомого об'ємного опору ρ_x , Ом·м, застосовують схему, зображену на рисунку 9.1, а), а для вимірювання питомого поверхневого опору ρ_s , Ом, схему зображену на рисунку 9.1, б).

Вимірюється струм I , який проходить у схемі від вимірювального електрода 1 через зразок 4. У схемі (рис. 9.1, а) струм по поверхні зразка від нижнього електрода 2, до якого підведена напруга, відводиться на заземлення через охоронний електрод 3 і не потрапляє у вимірювальне коло. При вимірюванні ρ_s (рисунок 9.1, б) вимірюваний струм проходить від електрода 3 до електрода 7 по поверхні зразка. У цьому випадку електрод 2 заземлений.

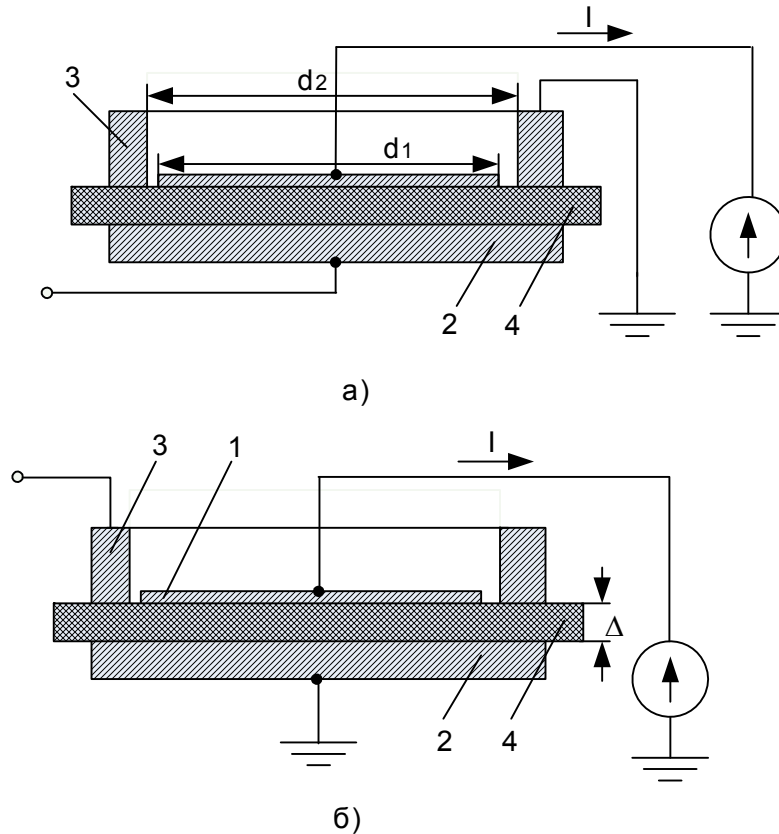


Рисунок 9.1 - Система з трьох електродів для вимірювання об'ємного і поверхневого опорів

Кільцевий зазор між електродами 1 і 3 має бути мінімальним (звичайно 2 мм). Розрахунковий діаметр дорівнює $d_{cp} = (d_1 + d_2)/2$. Тоді можна записати співвідношення

$$R_v = \rho_v \frac{4\Delta}{\pi d_{cp}^2}; \rho_v = d_{cp}^2 \pi R_v / 4\Delta, \quad (9.3)$$

$$R_s = \rho_s \frac{\Delta_1}{\pi d_{cp}}; \rho_s = \frac{\pi d_{cp} R_s}{\Delta_1}, \quad (9.4)$$

де Δ – товщина зразка;
 R_v і R_s – опори зразка при вимірюваннях за схемами (рисунок 9.1, а) і б), відповідно;
 $\Delta_1 = (d_2 - d_1)/2$.

Неточності при вимірюваннях електричного опору ізоляції значною мірою залежать від підготовки зразка і застосовуваних електродів. Перед вимірюваннями зразки повинні тривалий час утримуватись при заданій температурі і вологості. Поверхня зразків не повинна бути забрудненою.

До електродів висуваються такі вимоги:

- електрод повинен мати високу провідність і забезпечувати гарний електричний контакт по всій поверхні зіткнення зі зразком;
- в умовах випробувань електрод не повинен впливати на випробуваний зразок (деформувати його, здійснювати хімічний вплив і т.д.);
- електрод має бути таким, щоб його легко було наносити і зручно застосовувати при випробуваннях.

Масивні електроди виготовляють з нержавіючої сталі, міді і латуні. Фольгові електроди з'єднують зі зразком трьома способами. Щільний контакт зі зразком досягається шляхом притирання електрода до його поверхні за допомогою мастила (вазеліну, трансформаторного масла або кремнійорганічної рідини). Як правило, товщина шару мастила не повинна перевищувати 1 мкм. При вимірюваннях для зразків із пластмас застосовують пресування з нагріванням. Фольгові електроди можна також притискати до зразка через гуму під тиском 10 кПа.

Електроди з осаджених металів у вигляді щільно прилягаючих плівок можуть бути виконані зі срібла, золота, платини, міді, алюмінію. Звичайно це роблять способом напилювання у вакуумі шляхом випаровування металу при нагріванні або катодного напилювання. На неорганічні матеріали можна наносити електроди зі срібла способом впалювання зі спеціальних паст. При цьому потрібно нагрівання до декількох сотень градусів.

Як мастила для електродів можна застосовувати суспензії, наповнені розпиленним графітом (лаки, олії, вода). Товщина мастила має бути приблизно на порядок меншою за товщину зразка, а її питома провідність - на кілька порядків більшою, ніж у зразка.

Загальні вимоги при визначенні електричного опору ізоляції кабельних виробів регламентовані ГОСТ 3345-76. Напруга при вимірюваннях від - 90 до 500 В. Похибка повинна бути не більше 10% при вимірюваннях опору до 10^{10} Ом і не більше 25% при опорі 10 Ом і більше. Точність вимірювання температури регламентується в конкретних стандартах на вироби.

Опір ізоляції повинен бути вимірюваним:

- для виробів без металевої оболонки, між жилою і металевим циліндром, на який навивається виріб, між жилою і водою, між жилою й іншими жилами, з'єднаними між собою (і з водою);
- для виробів з металевою оболонкою, екраном і бронею – між кожною жилою й іншими, з'єднаними між собою і з оболонкою чи екраном; у цьому випадку вимірювання можна робити і за триелектродною

схемою відповідно до рисунка 9.2. Електроди 7, 2, 3 відповідають рисунку 9.1.

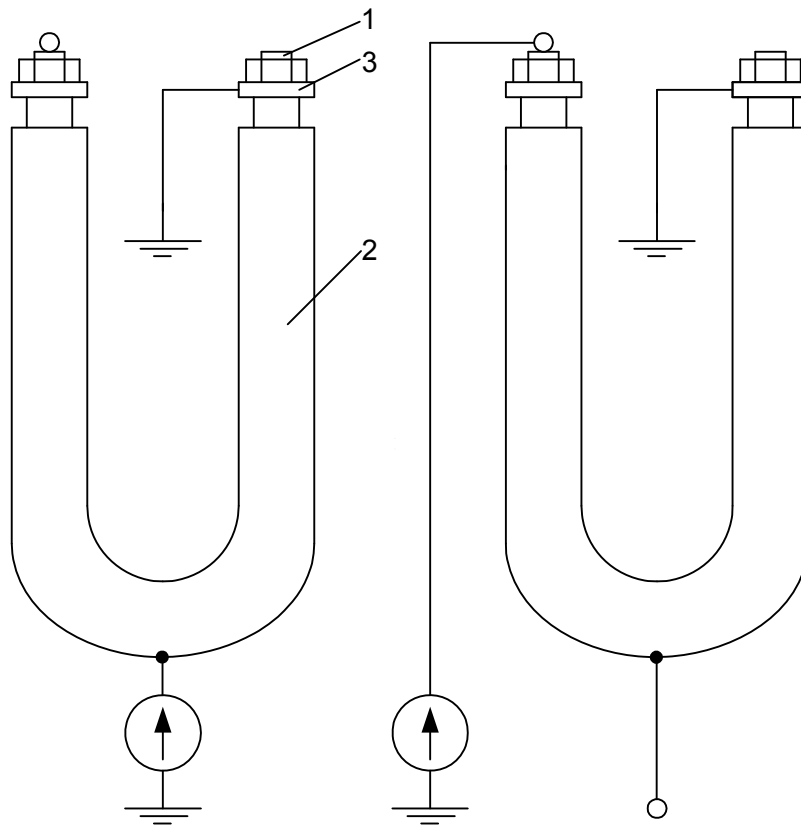


Рисунок 9.2 - Підключення кабелю при вимірюванні електричного опору ізоляції:

1 – жила; 2 – оболонка або екран; 3 – охоронний електрод для виключення впливу струмів витoku по поверхні ізоляції

9.2 Вимірювання електричного опору і ємності з застосуванням магнітоелектричного гальванометра

Схема вимірювань методами безпосереднього відліку показань гальванометра і порівняння показана на рисунку 9.3. Напруга джерела живлення може сягати 5000 В і більше. Зразок має опір R_x і ємність. У схемі передбачений обмежувальний зразковий опір R_0 , що дорівнює 0,1...10 МОм і зазвичай набагато менший за R_x . Зразкова ємність C_0 складає близько 10^{-7} Ф.

Чутливість гальванометра поступово підвищують у процесі вимірювання за допомогою перемикача шунта S_2 . Опір зразка розраховують за формулою

$$R_x = U/I = U/(k_r n \alpha) - R_0, \quad (9.5)$$

де α – відхилення по шкалі гальванометра;
 $n = I/I_r$ – (усі значення при S_1 у положенні 1).

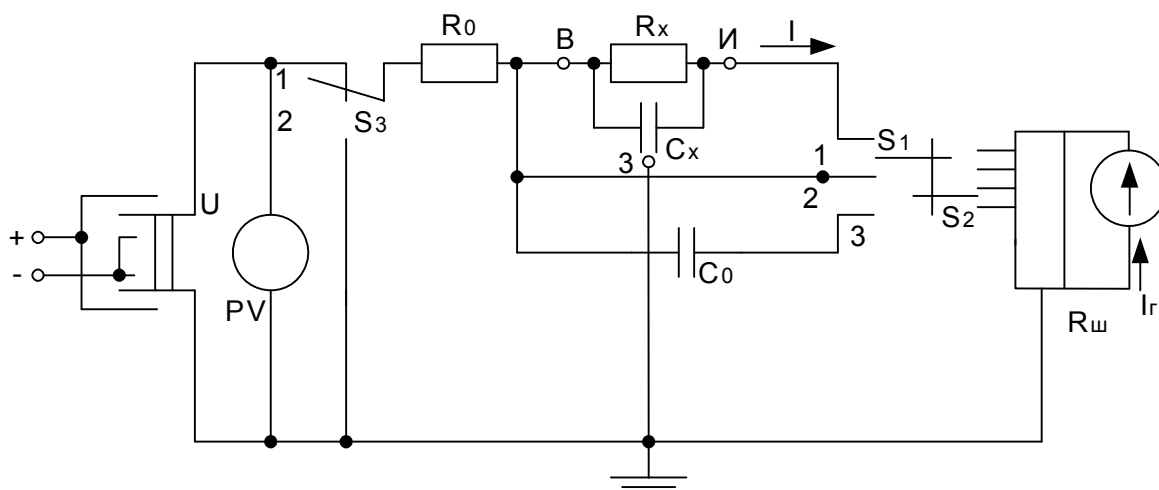


Рисунок 9.3 - Схема вимірювання електричного опору і ємності зразків: В, И, 3 – відповідно клеми підключення високої напруги, гальванометра і заземлення

Постійну гальванометра k_r можна уточнити шляхом вимірювання струму через R_0 при S_1 в положенні 2:

$$k_r = U / (R_0 n_0 \alpha_0). \quad (9.6)$$

При цьому метод двох вимірювань називають методом порівняння. Після підстановки k_r з (9.6) у (9.5) одержимо

$$R_x = R_0 \left(\frac{\alpha_0 n_0}{\alpha n} - 1 \right). \quad (9.7)$$

Якщо в схемі використовувати балістичний гальванометр, то її можна застосовувати для вимірювання ємності зразків. Перемикач S_1 ставлять у положення 3. Далі перемикач S_3 переводять з положення 1 у положення 2. У момент переключення через гальванометр протікає струм розряду конденсатора. Кількість електрики при розряді дорівнює

$$Q_0 = k_6 \beta_0 n_0 = C_0 U, \quad (9.8)$$

де β_0 і n_0 – максимальне відхилення гальванометра і шунтове число при вимірюванні зразкової ємності. Друге вимірювання проводять у положенні 1 перемикача S_1 . Ємність зразка

$$C_x = C_0 \frac{\beta n}{\beta_0 n_0}. \quad (9.9)$$

Вимірювання при високій напрузі зручно проводити методами зарядження конденсатора (рисунок 9.4) і саморозряду вимірюваного зразка.

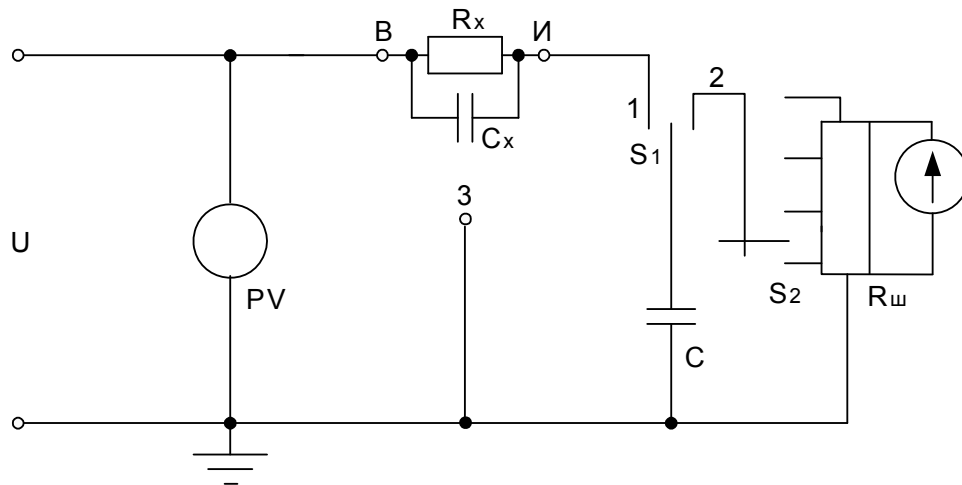


Рисунок 9.4 - Схема вимірювання методом заряджання конденсатора

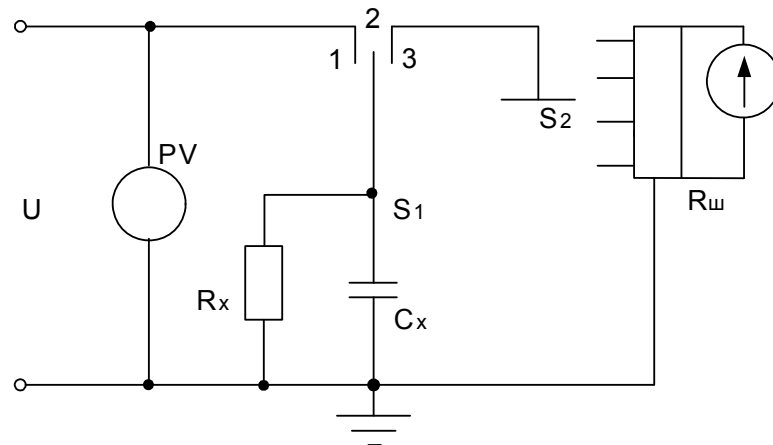


Рисунок 9.5 - Схема вимірювання електричного опору ізоляції методом саморозряду

У методі заряджання конденсатора С останній заряджається через вимірюваний зразок R_x . Постійна часу саморозряду конденсатора С, рівна RC , повинна бути багато більшою за $R_x C_x$ і $C \gg C_x$. Напруга на конденсаторі зростає згодом відповідно до залежності

$$U_c = U[1 - \exp(-t/CR_x)].$$

Якщо t/CR_x менше 0,1, то для розряду конденсатора одержимо

$$Q = U_c C \approx Ut / R_x. \quad (9.10)$$

Перекидаючи S_1 з положення 1 у положення 2 у заданий момент часу t балістичним гальванометром вимірюємо заряд Q і за (9.10) обчислюємо R_x .

У схемі (рисунок 9.5) при положенні 7 перемикача S_1 спочатку заряджаємо випробовуваний кабель до високої напруги U , потім установлюємо S_1 у нейтральне положення 2 і в цей момент час t беремо рівним нулю. Через якийсь час t вимірюємо заряд на C_x балістичним гальванометром, переключаючи S_1 у положення 3. Заряд на конденсаторі змінюється за формулою

$$Q_x = UC_x \exp[-t/(R_x C_x)] = Q \exp[-t/(R_x C_x)]. \quad (9.11)$$

Побудувавши залежність заряду від часу за (9.11) можна обчислити R_x . Початковий заряд Q обчислимо за результатами вимірювання заряду при $t = 0$. Цей метод дозволяє одержати тільки наближену оцінку R_x , тому що опір ізоляції залежить від напруги.

9.3 Вимірювання електричного опору з застосуванням схем з підсилювачами

При вимірюванні опорів більше 10^{11} Ом чутливість схем із застосуванням гальванометра може бути недостатньою. У цих випадках використовують схеми з підсилювачами. Загальний принцип вимірювання показаний на рисунок 9.6

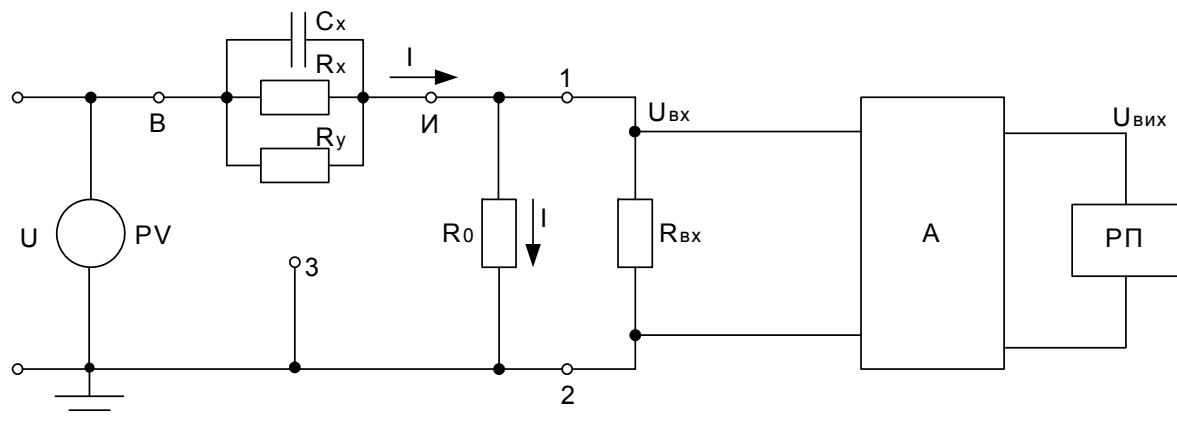


Рисунок 9.6 - Схема вимірювання електричного опору з застосуванням підсилювачів

Струм I при вимірюваннях протікає через зразок R_x і зразковий опір R_0 . При вимірюваннях звичайно виконується співвідношення $R_0 = (10^{-2} - 10^{-5}) R_x$. Струм витоку в конструктивних затискачах зразка (через R_y) має бути багато меншим I ($R_y \gg R_x$). Вхідний опір R_{vx} підсилювача A має бути багато більшим R_y . Реєстраційний прилад звичайно вимірює вихідну напругу або струм підсилювача. При вказаних умовах

$$R_x = R_0 U / U_{vx} = R_0 U / U_{вих}, \quad (9.12)$$

де $k = U_{вих} / U_{vx}$ – коефіцієнт підсилення підсилювача.

Максимальне значення вимірюваного опору і точність вимірювань багато в чому визначаються якістю ізоляції конструкції вимірювальної комірки (величиною R_y) і забезпеченням великого значення вхідного опору підсилювача. Крім того, це залежить від R_0 – він має бути 10^{11} Ом і більшим. Чутливість застосовуваних приладів залежить від перешкод при вимірюваннях, тому всі проводи і деталі, зв'язані з затискачем 1, мають бути ретельно екрановані. Напруга живлення не повинна мати пульсації (і інших імпульсних змін), тому що змінна складова напруги досить вільно проходить до затискача 1 через C_x . Напруга на затискачах 1, 2 вимірюється кількома способами. Для цієї мети можуть бути використані електростатичні електрометри, вхідний опір яких сягає 10^{17} Ом, ємність - $2,5 \div 5$ пФ. Електрометри бувають квадрантні, струнні і крутильні (ЭС-2, СГ-1М) [27].

Перший каскад підсилювачів постійної напруги виконується звичайно з застосуванням електрометричної лампи (ЭМ-5, ЭМ-6). Завдяки спеціальній конструкції і режиму роботи вхідний опір електрометричного підсилювача досягає $10^{14} - 10^{15}$ Ом. Наступні каскади підсилення виконуються транзисторами. Перший каскад може бути виконаний також із застосуванням польових транзисторів (вхідний опір $10^{12} - 10^{14}$ Ом). Для стабілізації коефіцієнта підсилення і роботи всього приладу в цілому застосовуються схеми з негативним зворотним зв'язком (рисунк 9.7). Опір зразка за схемою (рисунк 9.7) розраховується за формулою:

$$R_x = R_0 \frac{U}{U_{\text{вих}}} \frac{R_1 + R_2}{R_2}. \quad (9.13)$$

За цією схемою виконані тераомметри ЕК6-11, ЕК6-7, Е6-14. Їхні основні параметри наведені в таблиці 9.1.

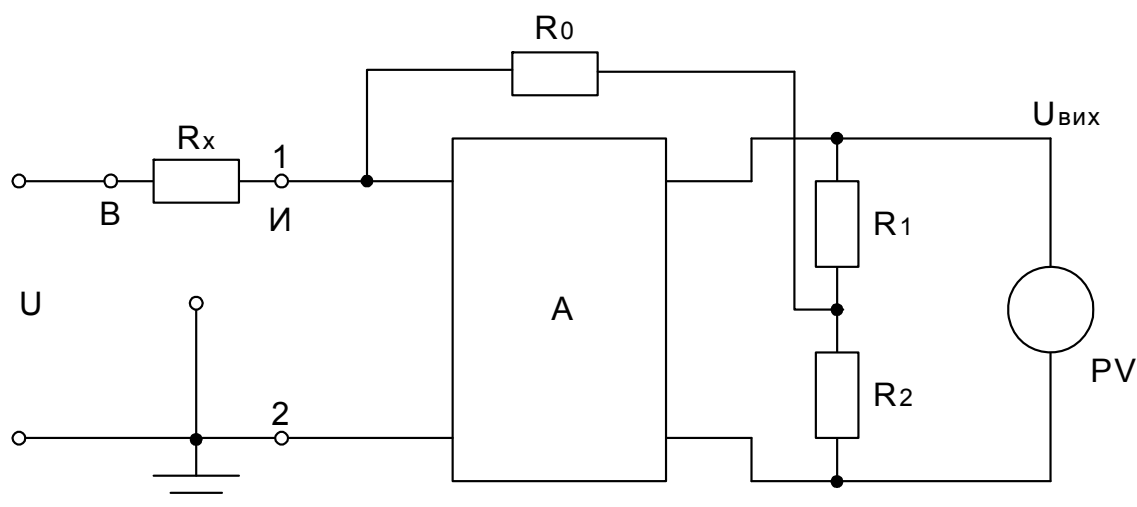


Рисунок 9.7 - Схема вимірювання електричного опору з застосуванням електрометричного підсилювача з негативним зворотним зв'язком

Таблиця 9.1 - Параметри тераомметрів

Тип приладу	Діапазон вимірювання опорів, Ом	Похибка вимірювань, %	Напруга при вимірюваннях, В
ЕК6-11	$3 \cdot 10^7 - 10^{15}$	6–10	2,5–500
ЕК6-7	$10^7 - 10^{17}$	4–10	1–1000
Е6-14	$10^7 - 10^{17}$	—	—

Якщо на вході підсилювача застосувати перетворювач постійної напруги в змінну, то посилення змінної напруги здійснюється легше, і підсилювачі працюють стабільніше. При цьому можна вимірювати дуже великі опори. Як перетворювач можна, наприклад, використовувати динамічний конденсатор з газовим діелектриком, один з електродів якого з'єднаний з вібратором так, що ємність конденсатора змінюється з певною частотою. Такий конденсатор можна підключити паралельно R_0 .

Для вимірювання напруги на R_0 у схемі (рисунок 9.4) можна використовувати цифрові автоматичні вольтметри з великим входним опором. При цьому можливе виведення на друкувальний пристрій і перетворення в код для застосування в системах з ЕОМ. Наприклад, вольтметр типу Щ1513 [2] на шкалі 0...0,3 В має входний опір 10^9 Ом. При цьому R_0 може бути $10^6 - 10^7$ Ом. Якщо за допомогою такого вольтметра виміряти U_x , рівне 0,05 В, а $U = 1000$ В, то максимальне значення R_x становитиме $R_0 U / U_{вх} = 10^7 \cdot 10^3 / (5 \cdot 10^{-2}) = 2 \cdot 10^{11}$ Ом.

10 Вимірювання повного опору, тангенса кута діелектричних втрат і ємності кабелів

10.1 Загальні 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 (рисунок 10.1).

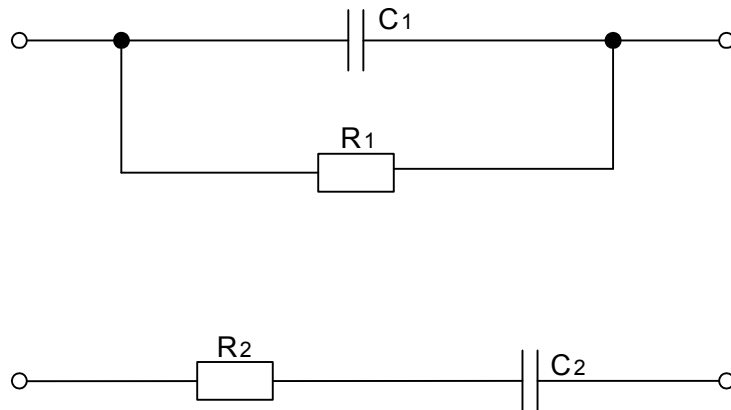


Рисунок 10.1 - Схеми заміщення вимірюваних зразків

Тангенс кута діелектричних втрат

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_p, \quad (10.1)$$

де I_a , I_p – активна і реактивна складові струму.

Для паралельної схеми заміщення одержимо

$$\begin{aligned} I_a &= U / R_1; \\ I_p &= U \omega C; \\ \omega &= 2\pi f; \\ \operatorname{tg} \delta &= 1 / (\omega C_1 R_1), \end{aligned} \quad (10.2)$$

де f – частота змінного струму.

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

$$C_x = I_p / (\omega U). \quad (10.3)$$

При цьому ємність паралельної схеми відповідає ємності, визначеній за (10.3).

Для послідовної схеми заміщення справедливі співвідношення

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_2 R_2; \quad (10.4)$$

$$I_p = U \omega C_2 / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (10.5)$$

Підставивши I_p з (3.5) у (3.3), одержимо формулу для C_x :

$$C_x = C_2 / (1 + \operatorname{tg}^2 \delta). \quad (10.6)$$

Отже, якщо розрахункові формули вимірювальної схеми приладу отримані для послідовної схеми заміщення, то отриману ємність C_x необхідно перерахувати за (10.6). 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 (10.6) нехтувати не можна.

При вимірюваннях ємності зразків діелектрика і кабелю застосовують електроди, показані на рисунках 10.1 і 10.2. Ємність таких зразків обчислюється відповідно за формулами

$$C_x = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{\pi d_1^2}{4} (1 + Bg);$$

$$C_x = \frac{2\pi \varepsilon \varepsilon_0}{\ln(R/r_0)} (1 + Bg). \quad (10.7)$$

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 перекручування електричного поля на краях електрода.

Якщо товщина електродів а більша за товщину зразка Δ , то $B = 1$.

Якщо $a < \Delta$, то B розраховують за формулою

$$B = 1 - 2,932 \frac{\Delta}{g} \lg \operatorname{ch} \left(0,7854 \frac{g}{\Delta} \right). \quad (10.8)$$

Вимоги до електродів і рекомендації з їхнього застосування аналогічні вимогам, викладеним у підрозділі 9.1. Варто підкреслити, що втрати енергії у біляелектродних шарах повинні бути набагато менші втрат у діелектрику. Зокрема, при використанні електропровідних мастил або при окисленій поверхні електродів електричний опір біля електродного шару r_e має задовольняти співвідношення

$$\omega \epsilon C_x \ll \operatorname{tg} \delta_x. \quad (10.9)$$

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

При вимірюваннях ϵ і $\operatorname{tg} \delta$ матеріалів за двоелектродною системою, коли електрод 3 на рисунку 10.1 відсутній, необхідно враховувати ємність крайового ефекту електродів. При вимірюваннях ϵ і $\operatorname{tg} \delta$ на тонких плівках великі погрішності можуть бути внесені внаслідок впливу біля електродних прошарків. У цьому випадку можна застосовувати метод вимірювання в рідкому діелектрику та у газі (метод двох середовищ). При цьому простір між електродними і твердим діелектриком заповнюється газом чи рідиною.

10.2 Вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних втрат

Ці вимірювання, 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 номінального до іспитового [16]. За цією характеристикою судять 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 (рисунк 10.2).

Основний міст 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

$$Z_x Z_4 = Z_0 Z_3, \quad (10.10)$$

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

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

Підставивши значення комплексних опорів у (10.10) і прирівнявши дійсні і уявні частини рівняння, одержимо

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_3} \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad \operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4. \quad (10.11)$$

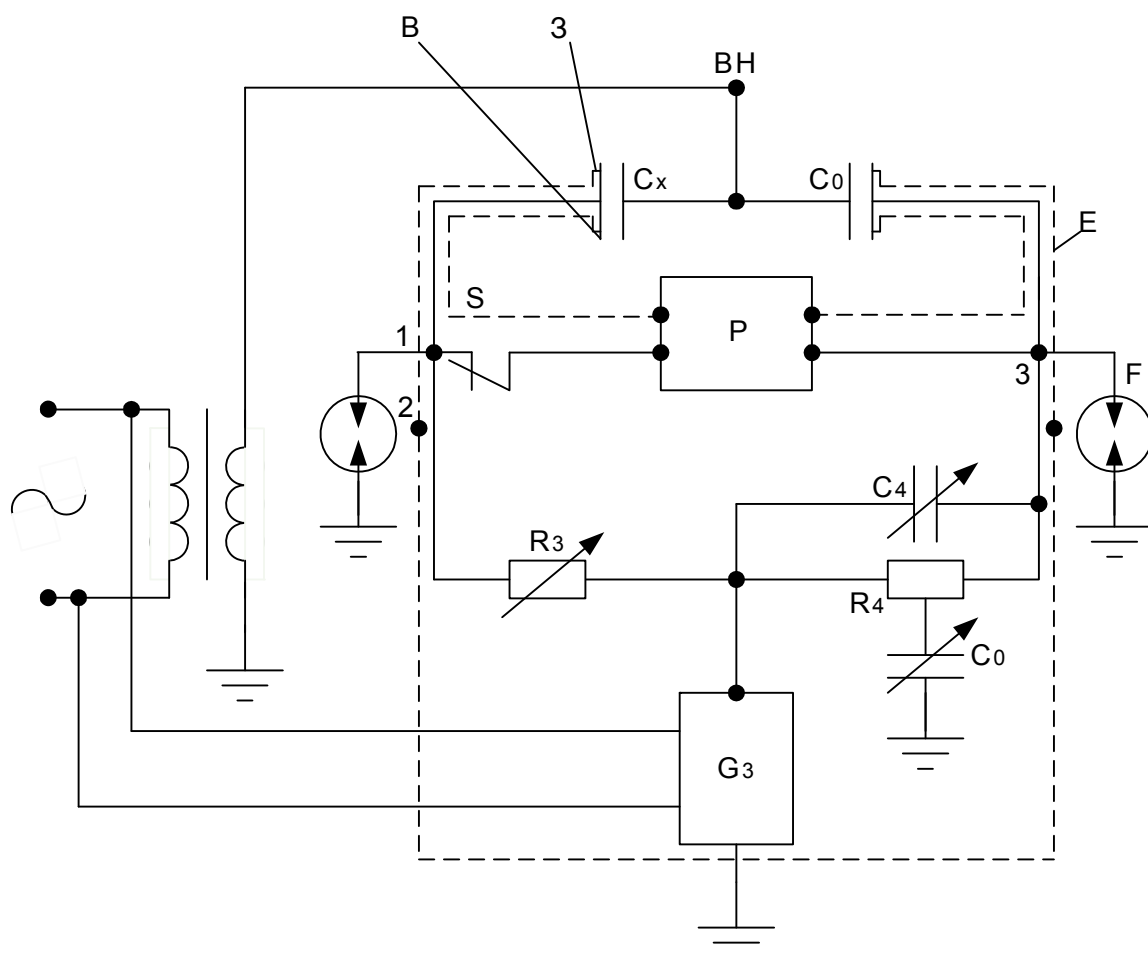


Рисунок 10.2 - Схема моста з захисною напругою:
В – вимірювальний електрод; 3 – заземлений електрод

Зразковий конденсатор C_0 повинен мати $\text{tg } \delta_0$ близьким до нуля, виконується конденсатор з газоподібними діелектриками і його ємність приблизно дорівнює 100 пФ. Він має витримувати напругу 10 кВ без часткових розрядів. Зразкові конденсатори на напругу 100 і 600 кВ виготовляють з ізоляцією з газу (азоту) під тиском 1,5 МПа. Елементи R_3 і C_4 виготовлені у вигляді декадних магазинів опорів і ємностей, $R_4 = 10^4/\pi$ Ом. Тоді з (10.11) випливає, що $\text{tg } \delta = C_4 \cdot 10^6$, таким чином $\text{tg } \delta = 1$ при $C_4 = 1 \text{ мкФ}$. Шкала приладу градуйована безпосередньо в значеннях $\text{tg } \delta$.

Як індикатор рівноваги P використовують вібраційний гальванометр із підсилювачем або магнітоелектричний прилад з підсилювачем. Підсилювач повинен мати мінімум власних шумів. Зручно використовувати також індикатор з електронно-променевою трубкою. Перевага вібраційного гальванометра полягає в тому, що він настраюється в резонанс на частоту напруги при вимірюваннях і не реагує на вищі гармоніки.

Врівноважування 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 блоку G_3 . При цьому послідовно регулюють напругу блоку G_3 за значенням і фазою, добиваючись нульового показання 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 і екранами E відсутній, отже, ємність і діелектричні втрати в з'єднувальних проводах не впливають на результати вимірювань.

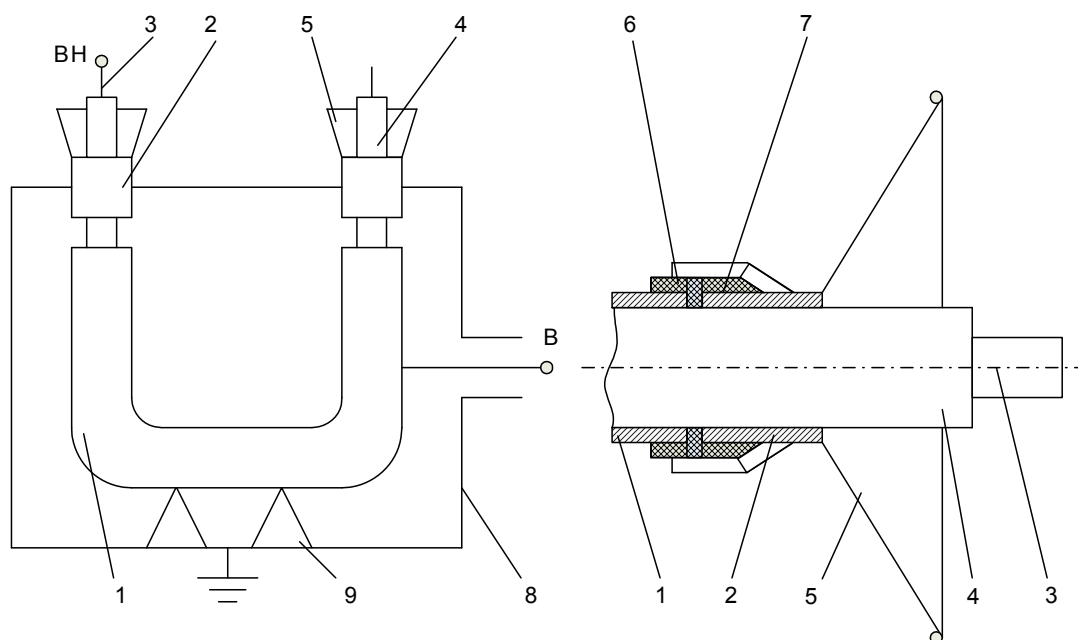


Рисунок 10.3 - Підключення кабелю до вимірювальної схеми:

7 – 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. Підключення трансформатора високої напруги за регулюючою схемою, інші міри техніки безпеки викладені в розділі 5. Кабелі підключаються відповідно до рисунка 10.3, а). Конструкція охоронного електрода показана на рисунку 10.3, б). Конденсатор C_a служить для симетрування схеми при загальному регулюванні приладу.

Для вимірювань використовують мости Р5254 і Р5026. Міст Р5026 придатний для вимірювання ємностей від 10 до $5 \cdot 10^8$ пФ. Деякі характеристики моста Р5026 наведені в таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 - Характеристики моста Р5026 у діапазоні від 10 до 10^6 пФ

Діапазони вимірювань C_x , пФ	$\text{tg } \delta$	Основна допустима похибка %		Робоча напруга, кВ
		C_x	$\text{tg } \delta$	
$10 - 10^3$	$1 \cdot 10^{-4} - 0,1$	$\pm(0,5 + \frac{100}{C})$	$\pm(0,01 \text{tg } \delta + 2 \cdot 10^{-2})$	$5 - 10$
$10^2 - 10^5$	$1 \cdot 10^{-4} - 0,1$	$\pm(0,5 + \frac{50}{C})$	$\pm(0,01 \text{tg } \delta + 1 \cdot 10^{-4})$	$3 - 10$
$10^5 - 10^6$	$5 \cdot 10^{-4} - 0,1$	± 1	$\pm(0,025 \text{tg } \delta + 2 \cdot 10^{-4})$	$3 - 5$

При вимірюванні великої ємності і при напрузі більше 10 кВ через резистор R_3 протікають великі струми і його шунтують невеликими зразковими опорами r_3 підвищеної потужності.

Для компенсації впливу сполучних проводів при високій напрузі використовують схему з захисним колом (рисунок 10.4). Захисне коло складається з конденсатора високої напруги C_1 і регульованих R_2 , L_2 , C_2 . Напруга в точці В, до якої приєднують екрани, повинна дорівнювати за значенням і за фазою напрузі на діагоналі моста. Схему врівноважують послідовно при двох положеннях S . У положенні 1 міст врівноважують за допомогою R_3 і C_4 , а в положенні 2 – з допомогою R_2 , C_2 .

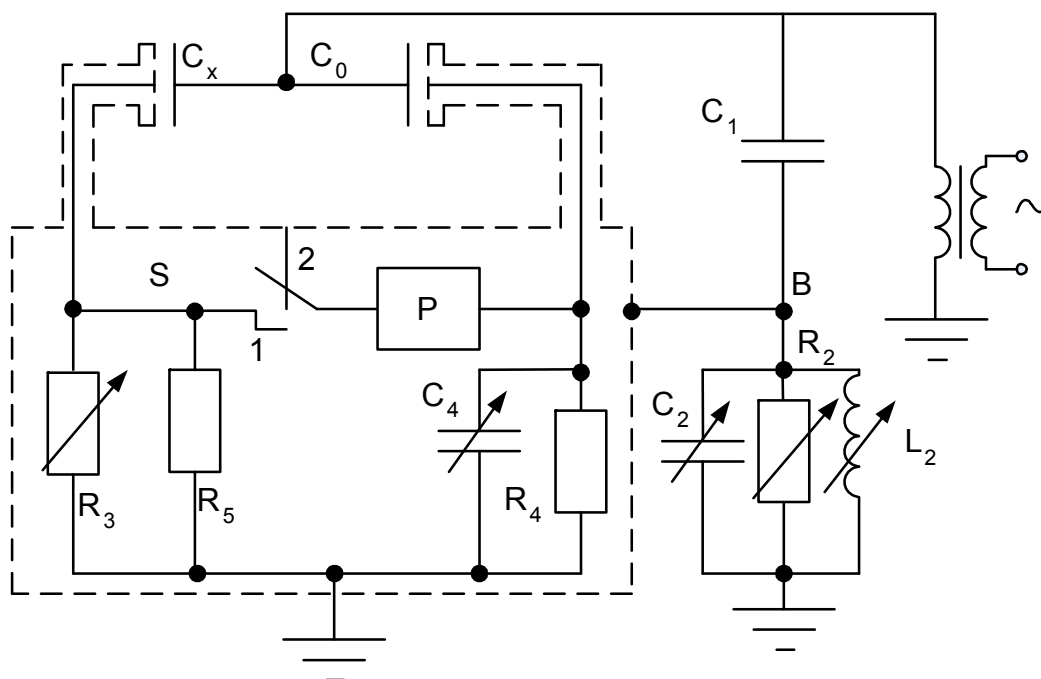


Рисунок 10.4 - Схема моста з захисним колом

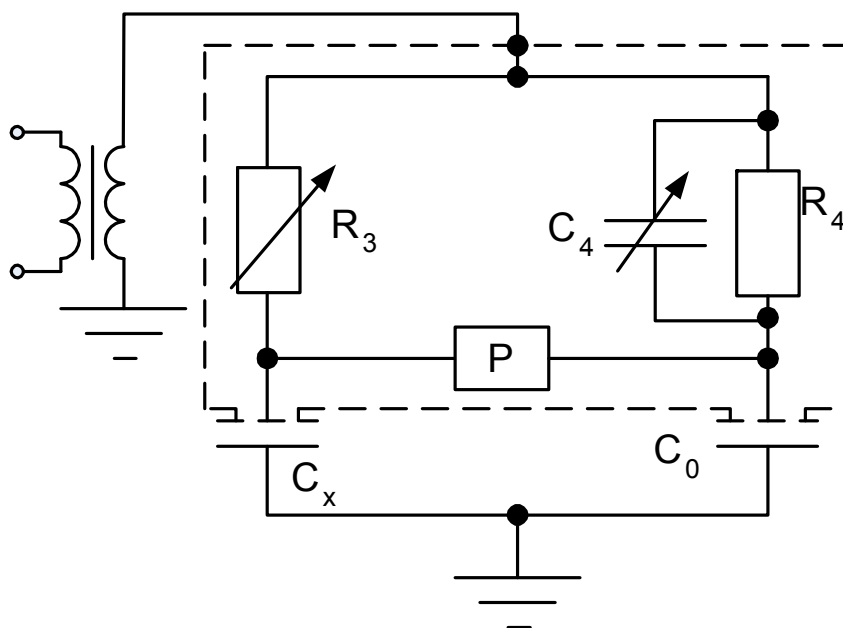


Рисунок 10.5 - Схема «переверненого моста» із заземленням одного з електродів зразка

Якщо один з електродів зразка C_x заземлений (оболонка кабелю), то вимірювання можна робити за схемою «переверненого моста» (рисунок 10.5). У цьому випадку екран (показаний штриховою лінією) і регульовані елементи схеми знаходяться під високою напругою. Регулювання R_3 і C_4 виконують через ізолюючі штанги.

При звичайній схемі включення виконують два вимірювання – при включеному і відключеному C_x . Сполучні проводи ємністю $C_{\text{п}}$ при заземленому зразку кабелю підключені паралельно C_x . При відключеному C_x вимірюють $C_{\text{п}}$. При включеному C_x вимірюють суму $C_c = C_x + C_{\text{п}}$. Значення C_x і $\text{tg } \delta_x$ обчислюють за формулами:

$$C_c = C_x + C_{\text{п}} ; \text{tg } \delta_x = (C_c \cdot \text{tg } \delta_c - C_{\text{п}} \cdot \text{tg } \delta_{\text{п}}) / C_c. \quad (10.12)$$

10.3 Вимірювання ємності і тангенса кута діелектричних утрат при частотах $10^3 - 10^6$ Гц за допомогою мостів

При підвищенні частоти на результати вимірювань починають впливати власні ємності й індуктивності резисторів, взаємні ємності й індуктивності елементів схеми і власних індуктивностей сполучних проводів. У схемах застосовують як екранування кожного елемента схеми, так і екранування всієї схеми в цілому.

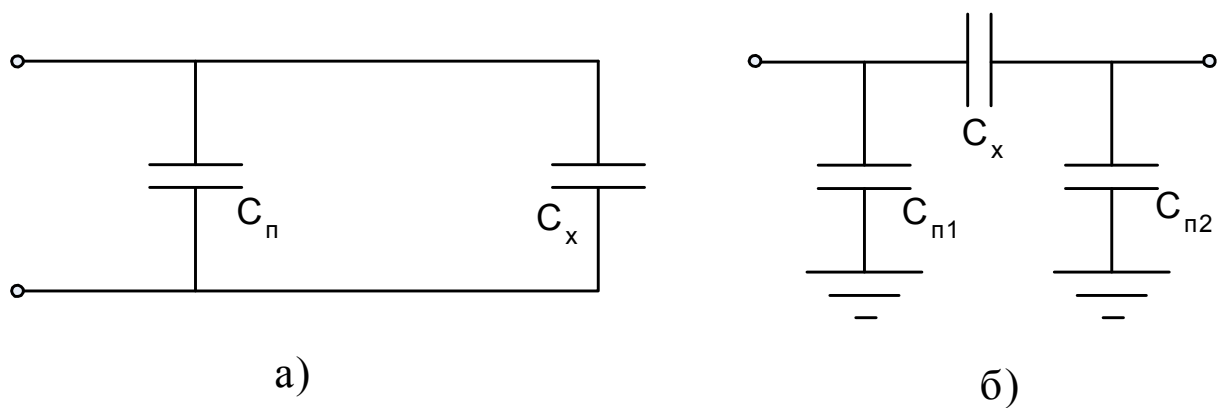


Рисунок 10.6 - Схема для обліку ємності сполучних проводів

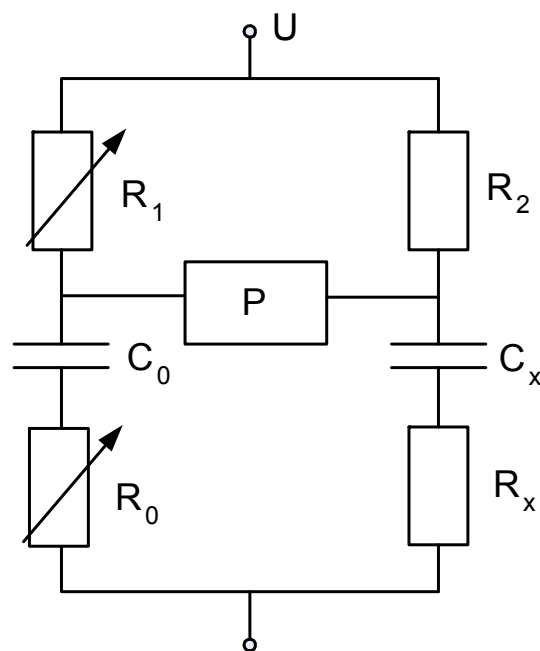


Рисунок 10.7 - Схема ємнісно-резистивного моста

Коли один з електродів зразка заземлений, застосовують метод вимірювання і підключення зразка, аналогічний поданим на рисунку 10.5, у тому числі і за відсутності охоронного електрода. При цьому C_n підключений паралельно вимірюваному зразку C_x (рисунок 10.6, а). Вимірювання проводять двічі при включеному і відключеному зразку C_x . Далі виконують розрахунок за (10.12).

Для випадку, коли обидва електроди вимірюваного зразка не заземлені, схема підключення конденсаторів між електродами і заземленням показана на рисунку 10.6, б). У кабельній техніці таке підключення характерне при вимірюванні ємності між двома жилами кабелю при заземленій оболонці екрані. В окремому випадку при вимірюванні ємності симетричних кабелів зв'язку значення C_{n1} і C_{n2} однакові.

Можливі різні варіанти побудови схем резисторно-ємнісних мостів, що задовольняють умову (10.10). На рисунку 10.7 наведено приклад такої

схеми. Якщо комплексний опір вимірюваного зразка Z_x подати у вигляді послідовної схеми заміщення (див. рисунок 10.1), то з (10.10) одержимо

$$C_x = C_0 R_1 / R_2; \quad \operatorname{tg} \delta_x = C_0 R_0 \omega, \quad (10.13)$$

де C_x розраховано для послідовної схеми заміщення.

Резистори R_1 і R_3 можна проградувати в одиницях ємності і $\operatorname{tg} \delta$. Ємність C_x повинна мати мінімальне значення $\operatorname{tg} \delta$.

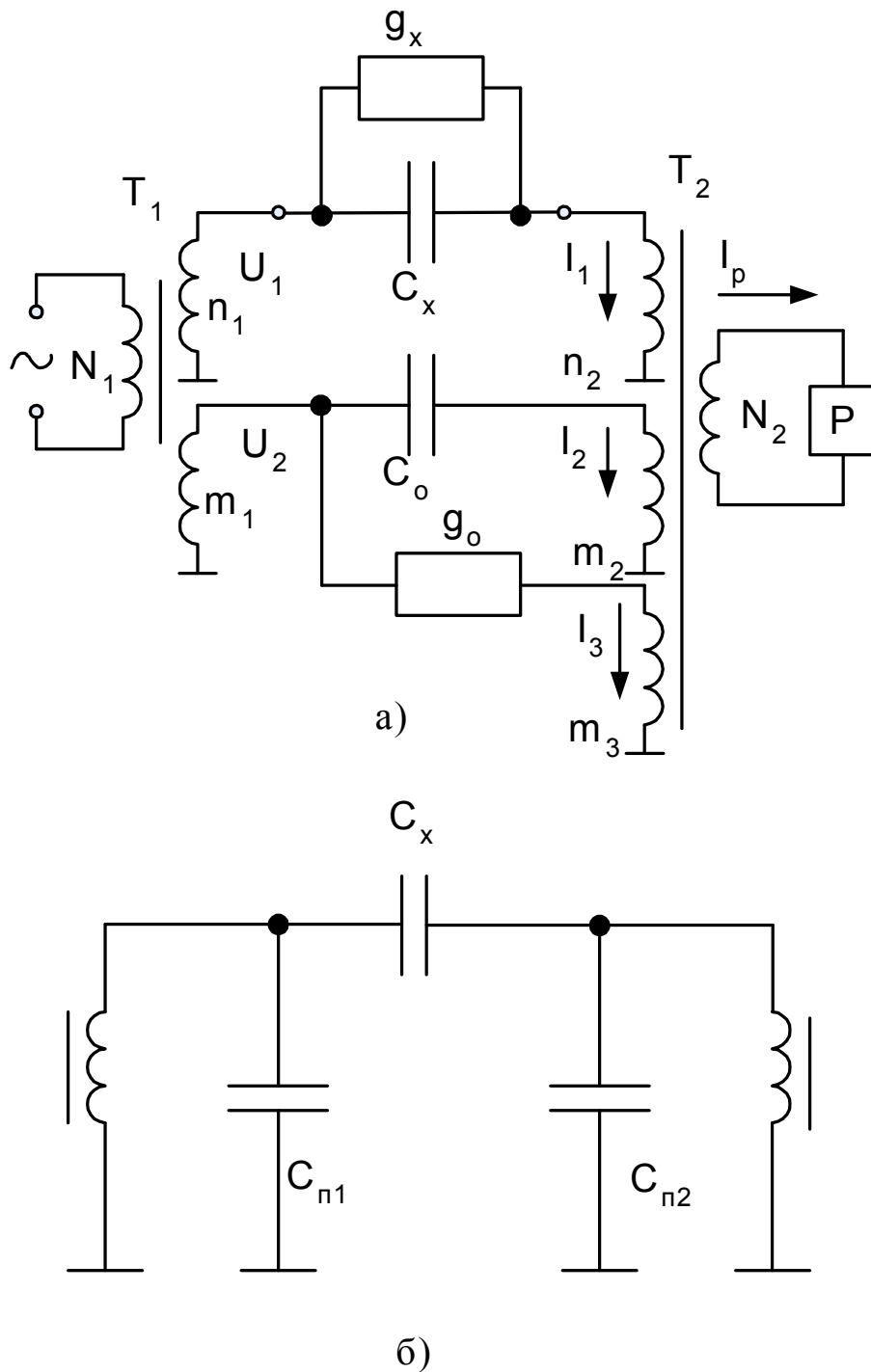


Рисунок 10.8 - Схема трансформаторного моста

Високу чутливість і зручне регулювання схеми мають трансформаторні мости. Схема такого моста в загальному виді зображена на рисунку 10.8, а) (прилад Е8-4). Напруги U_1 і U_2 , що діють на вимірюваних об'єктах $C_x, g_x (1/R_x)$ і зразкових елементах C_0 і g_0 , вводяться в схему моста за допомогою трансформатора напруг T_1 , а порівняння струмів, що протікають через кожне з цих кіл, виконується трансформатором T_2 , обмотки m_1 і m_2 якого включені зустрічно стосовно n_2 (m і n відповідають числам витків).

Умовою рівноваги моста є виконання умови $I_p = 0$. Якщо індикатор P виконаний з малим вхідним опором, то

$$\begin{aligned} I_p &= I_1 \frac{n_2}{N_2} - I_2 \frac{m_2}{N_2} - I_3 \frac{m_3}{N_2}; \\ I_1 &= U_1 j\omega C_x (1 - j \operatorname{tg} \delta); \\ I_2 &= U_2 j\omega C_0; \quad I_3 = U_2 g_0; \\ U_1 &= U_0 \frac{n_1}{N_1}; \quad U_2 = U_0 \frac{m_1}{N_1}; \\ I_p &= A + jB, \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} A &= \frac{U_0}{N_1 N_2} (n_1 n_2 C_x \omega \operatorname{tg} \delta_x - m_1 m_3 g_0); \\ B &= j\omega \frac{U_0}{N_1 N_2} (n_1 n_2 C_x - m_1 m_2 C_0). \end{aligned}$$

При балансі схеми $A=0$ і $B=0$ в результаті одержимо

$$C_x = (m_2 m_1 C_0) / n_1 n_2; \quad (10.14)$$

$$\operatorname{tg} \delta_x = (m_3 / m_2) \cdot (g_0 / \omega C_0). \quad (10.15)$$

При постійних значеннях $C_0 \frac{m_0}{m_1 n_2} \frac{g_0}{m_2 \omega C_0}$ і величини m_1 і m_0 можуть бути проградуїровані в значеннях C_x і $\operatorname{tg} \delta_x$.

Обмотки m_1 і m_3 повинні забезпечувати багаторозрядну зміну числа витків, що показано на рисунку 10.9 для дворозрядного переключення. При цьому T_1 повинний мати дві обмотки m'_1 і m''_1 . Допоміжний масштабний трансформатор T_3 має коефіцієнт трансформації 0,1. Тоді якщо переключення m'_1 змінює C_x на одиниці, то переключення m''_1 – на десяті частки одиниці.

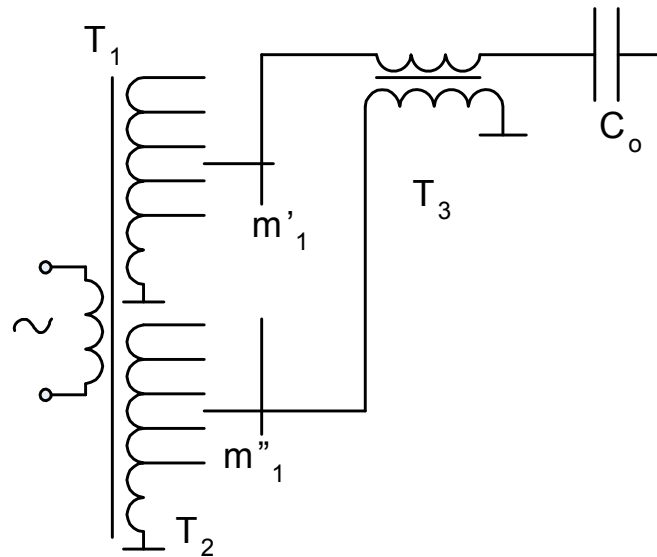


Рисунок 10.9 - Схема дворозрядної зміни чисел витків трансформатора

Підключення конденсатора C_x до трансформаторного моста показано на рисунку 10.8, б). Шунтуючий вплив заземлювальних ємностей незначний, тому що обмотка n_1 трансформатора T_1 має малий вихідний опір, а обмотка n_2 трансформатора T_2 має малий вхідний опір, обумовлений малим вхідним опором індикатора P . Тому трансформаторний міст дозволяє виконувати вимірювання прохідної ємності триелектродного конденсатора при порівняно великих його часткових ємностях щодо заземлення без утрати точності. Як індикатори рівноваги мостів при підвищених частотах використовують гальванометри з підсилювачем. При балансуванні мостів зручний індикатор з електронно-променевою трубкою, схема включення якого показана на рисунку 10.10.

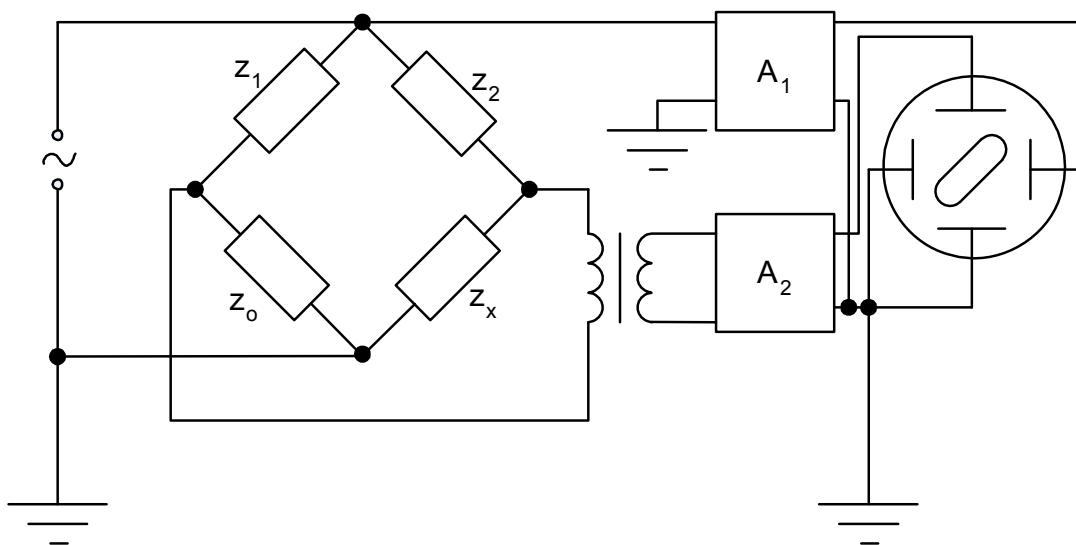


Рисунок 10.10 - Схема включення індикатора з електронно-променевою трубкою

Таблиця 10.2 - Мости змінного струму

Міст	C, пФ	tg δ	Частота, Гц	Похибка вимірювання	
				C	tg δ
Цифровий Е7-8	0,01-10 ⁸	10 ⁻⁴ -1	10 ³	0,001C	0,005 tg δ + +5·10 ⁻⁴
Цифровий Е8-4	0,3-1,5х10	5х10 ⁻⁴ - 0,1	10 ³	0,001C+0,02	0,02 tg δ + +5·10 ⁻⁴
Цифровий Р589	10 ² -10 ⁷ 0,01-100	5х10 ⁻⁴ - 0,1	10 ³	0,001C 0,001C+0,02/ C	0,02 tg δ + +3·10 ⁻⁴ Не нормує
Цифровий Р5010	0,1-10 ⁸	0-05	—	0,005C	0,02 tg δ + +1·10 ⁻³
Цифровий Р5016	10 ² – 10 ⁸	1х10 ⁻⁴ -1	1х10 ³ ; 5х10 ³ 1х10 ⁴ ; 5х10 ⁴	(0,0002- 0,002) C	0,01 tg δ + +5·10 ⁻⁴
МЛЕ-7АМ	10-10 ⁷	2х10 ⁻⁴ - 0,05	10 ³	0,001C+0,2	0,05 tg δ + +2·10 ⁻⁴
МЛЕ-9А	0,1-30	(2-30) 10 ⁻⁴	10 ⁶	0,02C+0,05	2х10 ⁻⁴
МЛЕ-12П	10-10 ³	2х10 ⁻⁵ - 0,001	10 ³	0,005C	0,02 tg δ + +2х10 ⁻⁵
Р571М	10-10 ⁸	10 ⁻³ -2	50-10 ⁴	0,001C+15	0,05 tg δ + +5·10 ⁻⁴
УМЕ-10А	1-10 ⁷	5х10 ⁻⁵ - 0,1	40-10 ⁵	(0,00001- 0,001)C	10 ⁻⁶ -2·10 ⁻⁴
УМЕ-11	1-10 ³	(1- 300)10 ⁻⁴	10 ⁵ -10 ⁷	(0,001- 0,002)C	2х10 ⁻⁵ -5·10 ⁻⁴
Е7-11	0,5-10 ³	0,005- 0,1	100; 1000	(0,01-0,02)C	0,1tg δ +0,005

Параметри деяких мостів, що випускаються промисловістю, наведені в таблиці 10.2. Напруга при вимірах не перевищує 100 В. Мости Е7-8, Е8-4, Р589, Р5010, Р5016 – цифрові автоматичні.

11 Випробування підвищеною напругою

11.1 Класифікація, призначення і загальні методи випробувань

Випробування напругою проводяться:

- при змінній напрузі (більшість дослідів);
- при імпульсній напрузі (кабелі високої напруги і спеціальні імпульсні кабелі);
- при постійній напрузі (кабелі постійної напруги, профілактичні випробування кабельних ліній).

Випробування можна розділити на такі групи:

- пробій порівняно коротких зразків при різному часі витримки під напругою;
- короткочасні випробування високою напругою;
- тривалі випробування при підвищеній напрузі (випробування силових кабелів на стабільність).

Напруга прикладається між жилою і заземленою металевою оболонкою (металева стрічка, фольга, металізована стрічка). У багатожильних кабелях напруга прикладається також між жилами. При відсутності таких оболонок і екранів зовнішній електрод повинний бути створений спеціально. Це може бути намотування з фольги. Іноді кабель чи провід занурюють у воду, напруга прикладається між жилою і водою.

В апаратах сухого випробування провід пропускають через ванну з металевими кулькоподібними електродами, що охоплюють провід у вигляді пружин.

Пробій емальованих проводів виробляється при доданні напруги між двома скрученими проводами, між проводами і металевим циліндром, на який навитий цей провід. Довжина проводу, число скруток, натяг регламентуються ДСТУ на відповідні проводи.

При випробуванні матеріалів зразки виготовляють у вигляді пластин товщиною 0,5 – 2 мм. Нижній електрод виконується у вигляді плоскої полірованої металевої пластини, або у вигляді циліндра з закругленими краями. Діаметр електродів і їхня форма обумовлюються в стандартах на відповідні випробування. Для запобігання перекриття за повітрям і зменшення впливу крайового ефекту електроди зі зразком можуть занурюватися в електроізоляційну рідину (мінеральна олія).

При високій напрузі між жилою й оболонкою може відбутися перекриття за повітрям, а також позначається вплив перекручування характеру розподілу напруженості електричного поля на пробій ізоляції. Тому при таких випробуваннях на кінцях зразків необхідно встановлювати спеціальні кінцеві муфти.

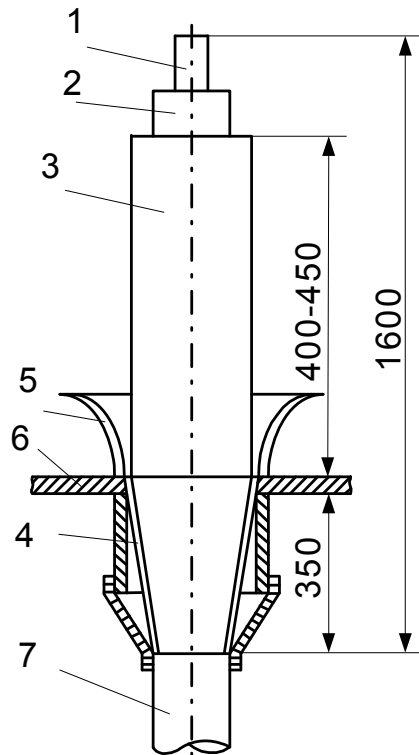


Рисунок 11.1 - Кінцевий пристрій при випробуваннях кабелю на напругу 110 кВ

Приклад конструкції муфти для випробувань кабелів на напругу 110 кВ показаний на рисунку 11.1. Свинцева оболонка 7 і екран з напівпровідних чи металізованих стрічок обрізаються. На основну ізоляцію 2 намотується додаткова ізоляція 3 із просочених маслом паперових стрічок. Поверх додаткової ізоляції намотується із дроту екрануючий вирівнювальний конус 4, який з'єднується з 7. Для вирівнювання електричного поля служить металевий екран 5. Уся конструкція кріпиться до опорної плити 6, а напруга підводиться до жили 1.

При виготовленні електродів і кінцевих муфт необхідно стежити за тим, щоб біля них не з'являлися газові включення, що призводить до виникнення часткових розрядів і перекручуванню результатів випробувань.

11.2 Електроустаткування при випробуваннях змінною і постійною напругами

Типова електрична схема випробувань напругою показана на рисунку 11.2. На первинну обмотку підвищувального трансформатора T_1 подають регульовану напругу U_1 . При цьому на зразку C_x буде напруга U_2 , що обчислюється за наближеною формулою

$$U_2 \approx kU_1, \quad (11.1)$$

де $k=W_2/W_1$; W_1 і W_2 – число витків у первинній і вторинній обмотках.

Для безпеки персоналу допоміжний контакт К8 встановлений у двері, що відкривають доступ в випробувальну зону високої напруги. При відкриванні дверей К8 розмикається. Якщо вимикач S_1 замкнутий, то загоряється лампа H_1 , що свідчить про те, що установка готова до роботи. При натисканні кнопки ПУСК К4 через обмотку магнітного пускача К7 йде струм і контакти К2 замикаються, при цьому кнопка К4 буде блокована. Напругу буде подано на регульовальні трансформатори T_2 і T_1 . При цьому загоряється лампа H_2 , що свідчить про те, що на установці з'явилася висока напруга (часто додатково на лампі H_2 висвічується табло «Висока напруга»).

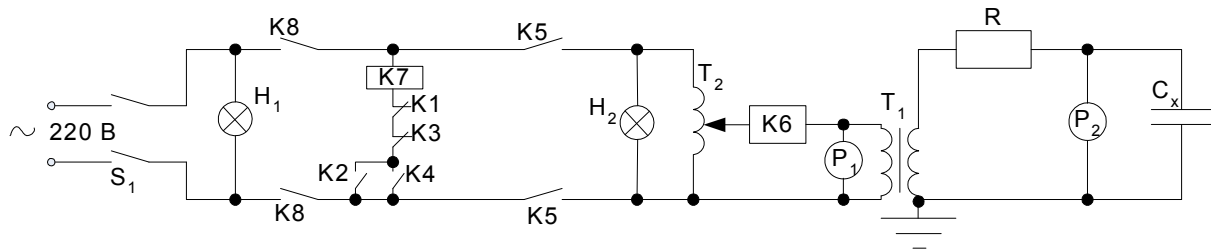


Рисунок 11.2 - Типова схема установки для випробувань високою напругою

При пробі зразка по обмотках T_1 протікає значний струм, обмотка реле максимального струму К6 розмикає контакти К1 і К5. Для повторного включення установки при цьому необхідно знову натиснути кнопку К4. При цьому попередньо необхідно знизити напругу U_1 за допомогою T_2 до нуля. Для вимикання установки необхідно натиснути кнопку К3, установка вимикається також при розмиканні К8.

Розглянута схема гарантує від враження людини високою напругою при виконанні таких нескладних правил:

1. Якщо хто-небудь з операторів знаходиться в зоні високої напруги, то двері установки повинні бути відкриті (К8 виключений);
2. Якщо в зоні високої напруги є не одні двері, то на кожних повинні бути вивішені табло з попередженням, що проходять випробування високою напругою;
3. Неприпустимо проникати руками чи за допомогою сторонніх предметів у зону високої напруги;
4. При проведенні монтажних робіт у зоні високої напруги необхідно виключити S_1 . Якщо лампи H_1 і H_2 не загоряються при відповідних переключеннях, то роботу варто припинити і справність установки повинна бути перевірена кваліфікованим співробітником;
5. Установка повинна бути обладнана гумовими килимками й іншим запобіжним інвентарем. До роботи на установці допускаються співробітники, що здали іспит на відповідну кваліфікацію.

Потужність устаткування випробувальної установки визначається ємністю зразків. При випробуванні коротких зразків на пробій необхідна вища напруга, але ємність зразків при цьому звичайно невелика. При випробуваннях силових кабелів напругою ємність може досягати 0,1 мкФ чи більше, при цьому струм і реактивна потужність у зразку

$$\begin{aligned} I_x &= U\omega C; \\ P_x &= U^2\omega C_x. \end{aligned} \quad (11.2)$$

Наприклад, для кабелів на напругу 110 кВ випробувальна напруга складає 159 кВ. Тоді при $C_x = 0,1$ мкФ потужність установки складе 800 кВ·А. При такій високій потужності утруднене плавне і точне регулювання напруги. Для зниження потужності регуляторів застосовується індуктивна компенсація ємнісного струму в зразку. Приклад такої компенсації показаний на рисунку 11.3. Трансформатор T_1 служить для одержання випробувальної напруги, а T_2 – для компенсації ємнісних струмів. Індуктивність T_1 з боку обмотки високої напруги w_4

$$L_4 = L(w_4/w_3)^2. \quad (11.3)$$

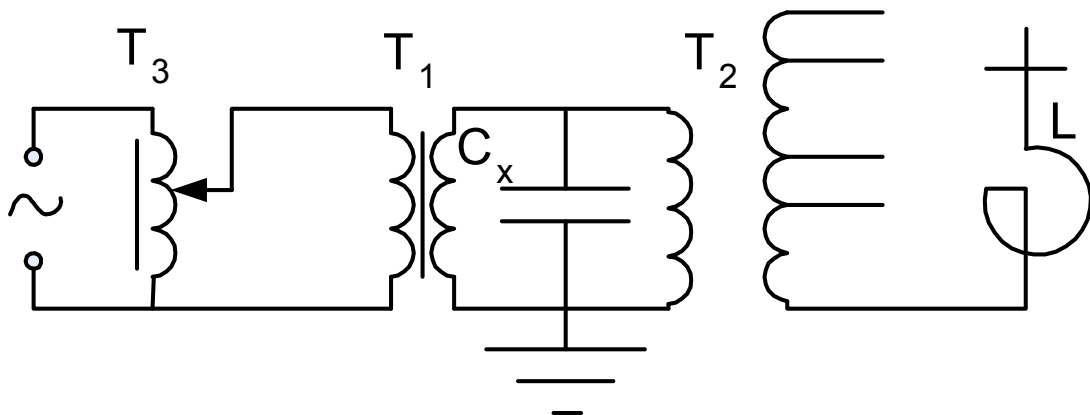


Рисунок 11.3 - Принципова схема компенсації реактивної потужності

Підключаючи набір індуктивностей L , можна домогтися наближеної компенсації струмів за умови

$$\omega L_4 = 1/(\omega C_x). \quad (11.4)$$

Тоді повна потужність трансформатора T_1 може бути зменшена до $P = U^2\omega C_x/Q$ (Q -добротність резонансного контуру), тобто в десятки разів. Настільки ж знижується і потужність регулювального трансформатора T_3 . Однак реактивна потужність T_3 і індуктивність L залишаються колишніми і P_x обчислюється за (11.2). Таким чином, головна перевага такої системи в зменшенні потужності T_3 і потужності, споживаної установкою з мережі.

Якщо в системі (рисунк 11.3) застосовується два чи три однакових трансформатори T_3 , то їхні обмотки високої напруги можуть бути з'єднані послідовно. Тоді така установка може бути використана для випробування коротких зразків кабелю на пробій.

В установках малої потужності як регулятор напруги використовується реостат, включений за схемою потенціометра. При потужності до 5 – 10 кВ·А – автотрансформатори. При потужності 25 кВ·А і більше застосовуються регулятори з рухливою короткозамкнутою котушкою.

Для одержання плавного регулювання і також напруги підвищеної частоти з формою кривої, близької до синусоїди, застосовуються окремі генератори змінної напруги, що обертаються синхронними двигунами. Плавно регулюючи струм порушення в обмотках генератора при невеликій потужності можливо плавно керувати напругою генератора при великій потужності.

Варто враховувати, що установки, призначені для випробувань при високій напрузі, мало придатні для випробувань при порівняно невеликій напрузі. Так, регулювання напруги на початку діапазону не буде плавним. Кожен трансформатор має характеристику, названу напругою короткого замикання U_k . Це напруга, при якій в первинній обмотці протікає номінальний струм $I_{ном}$ якщо вторинна обмотка замкнута. Якщо зразок буде пробитий при низькій напрузі чи, взагалі, обмотку замкнуть накоротко, а реле максимального струму налаштоване на $I_{ном}$, то установка відключається тільки при напрузі на первинній обмотці $U_1 \geq U_k$. При вимірюванні напруги на первинній обмотці оператор обчислить напругу пробою за (4.1): $U_{пр} = kU_k$. Наприклад, для трансформатора малої потужності $U_k \approx 0,05U_{ном}$. Допустимо, $k = 100$, $U_{ном} = 10$ кВ. Тоді $U_{пр} = kU_k = 500$ В, що не буде відповідати дійсності. У таких випадках напругу необхідно вимірювати безпосередньо на зразку (на вторинній обмотці трансформатора).

Для обмеження струму короткого замикання в коло включається захисний опір R (див. рис. 11.2). На цьому опорі при істотній ємності зразка може відбуватися помітний спад напруги. Погрішність ΔU , внесена цим опором, при вимірюванні напруги на первинній обмотці складає при постійній напрузі $\Delta U / U = R / R_x$, а при змінній – $\Delta U / U \approx 0,5R\omega C_x$.

При настроюванні реле на струм, менше $I_{ном}$, установка при високій напрузі може відключитися внаслідок значного ємнісного струму в зразку, що ще не буде пробитий.

При вимірюваннях постійною напругою використовуються схеми випрямлення з кремнієвими чи селеновими випрямлячами. Керування напругою виконується аналогічно до схеми на рисунку 11.2. Для одержання дуже високих напруг використовуються каскадні схеми багаторазового збільшення напруги. Після випробувань постійною напругою ємність зразка необхідно розрядити спеціальним розрядником.

Випробувані зразки виявляють себе як ємності, їхня стала саморозряду для діелектриків завжди перевищує 0,1 с. При цьому напруга на конденсаторі відповідає амплітудному значенню змінної напруги з автоматичною фільтрацією змінної складової. У деяких випадках необхідне підключення додаткової ємності паралельно C_x для поліпшення фільтрації (якщо $RC_x < 0,01$ с).

Кабельні лінії в процесі експлуатації періодично піддаються профілактичним випробуванням підвищеною постійною напругою, що у п'ять-сім разів вища за номінальну. При постійній напрузі інтенсивність часткових розрядів невелика й у процесі випробувань ізоляція не піддається додатковому руйнуванню. Потужність установки постійної напруги невелика, і її зручно використовувати на кабельних лініях. Випробувальна установка змінної напруги в цих умовах повинна мати дуже велику потужність.

При випробуваннях зразків зі значною ємністю похибка вимірювань напруги на первинній обмотці з використанням формули (11.1) може досягати $\delta U \approx I_x U_x / I_{\text{ном}}$. У цьому випадку більш точно можна виміряти напругу на вторинній обмотці трансформатора безпосередньо на зразку (якщо є захисний опір R – див. рисунок 11.2).

Безпосереднє підключення вольтметра можливо тільки при напрузі до декількох кіловольтів. При змінній і постійній напрузі до 100 кВ застосовуються електростатичні кіловольтметри.

Найточніше змінна напруга може бути виміряна з застосуванням вимірювального трансформатора напруги.

Якщо вторинна обмотка трансформатора w_2 має відводи, то до них може бути підключений вольтметр. При цьому відносний спад напруги внаслідок протікання струму на усій вторинній обмотці і на її частині буде однаковим і напруга обчислюється за формулою $U_2 = U_5 w_2 / w_5$.

У сучасних установках для вимірювання високої змінної напруги застосовуються ємнісні дільники напруги. До виводу високої напруги (рисунок 11.4) підключається конденсатор C_1 невеликої ємності, розрахований на роботу при найвищій робочій напрузі установки. Напруга на конденсаторі C_2 дорівнює $U_2 = U_1 C_1 / (C_1 + C_2)$. Ця напруга випрямляється, і на конденсаторі C_3 вимірюється напруга, яка дорівнює амплітудному значенню напруги.

У деяких випадках на результати випробувань може впливати чутливість і час спрацьовування реле максимального струму. Особливо це відноситься до випробувань зразків дуже малого розміру, до складу яких входять газові проміжки. При цьому для запобігання псуванню електродів при пробіі перегорання тонких проводів струм спрацьовування реле може складати чи десятки одиниці міліамперів, час спрацьовування також дуже малий. Такі умови створюються, наприклад, при випробуваннях на пробій тонких емальованих проводів, коли напруга підводиться між проводом і металевим циліндром.

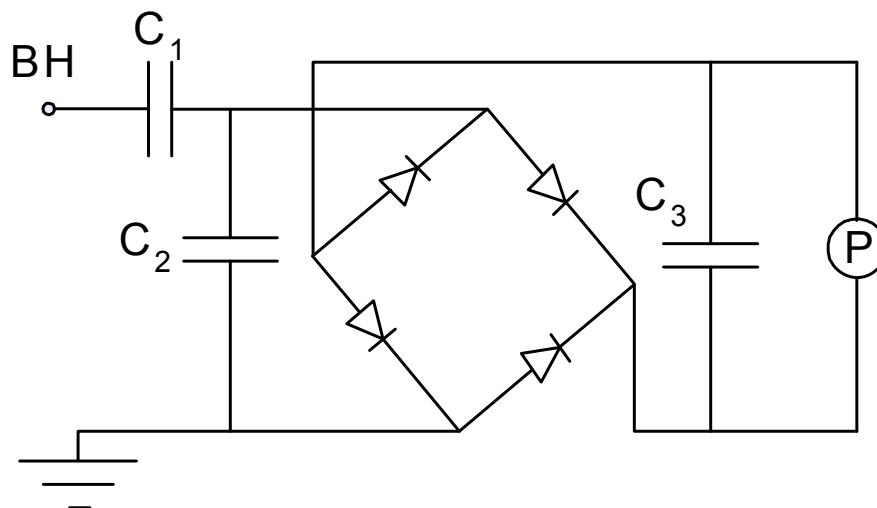


Рисунок 11.4 – Схема для вимірювання амплітуди напруги з застосуванням ємнісного діляника напруги

При підвищенні напруги спочатку пробивається повітряний шар між ізоляцією і циліндром, тоді як шар ізоляції може бути ще цілим. Відбувається частковий розряд, що створює імпульс струму, який приводить до спрацьовування реле і відключення установки. Напруга, при якій відключається установка, буде прийнята за пробивну напругу ізоляції проводу, що насправді ще не буде пробитою. Для запобігання такій невідповідності струм спрацьовування максимального реле повинний бути не менше декількох десятків міліамперів і регламентований у технічних умовах.

У ряді випадків застосовується безперервне випробування напругою на проходження. Так, у стандартах на емальовані проводи малих діаметрів (менше 0,35 мм) обговорене визначення числа точкових ушкоджень на певній довжині (звичайно 15 м). Провід пропускається через фетрові обтиски, на довжині 20 мм змочені водою. Напруга на вологому контакті звичайно складає 60 В. Довжина контакту 20 мм. Швидкість руху проводу 22–25 м/хв. Час спрацьовування лічильника точкових ушкоджень повинен бути менше часу проходження ушкодження через контакт.

Електричний опір ушкодження, при якому спрацьовує лічильник, складає 250 кОм.

Проводи з гумовою ізоляцією випробовуються підвищеною напругою безупинно по всій довжині за допомогою апаратів сухого випробування (АСВ). Такі апарати встановлюються безпосередньо на ізолювальній установці. Для підвищення безпеки випробування проводять при підвищених частотах (20 кГц) за допомогою установок ЗАСВ (звукові АСВ) чи при часто повторюваних короткочасних імпульсах за допомогою ІАСВ (імпульсні АСВ).

11.3 Випробування імпульсами високої напруги

Кабелі високої напруги випробовують аперіодичними імпульсами, форма яких показана на рисунку 11.5. Стандартний грозовий імпульс має тривалість фронту $\tau_f = 1,2$ мкс і тривалість імпульсу $\tau_u = 50$ мкс. Допускається застосовувати стандартний імпульс з накладеними на нього коливаннями й одиничними викидами напруги за умови, що найбільші відхилення напруги від середньої кривої не перевищують поблизу її максимуму 5% від цього значення, а період накладених коливань не перевищує 2 мкс.

У зрізаного грозового імпульсу після моменту зрізу напруга стрімко зменшується до нуля. Зріз може відбуватися на фронті, при амплітудному значенні і на спаді імпульсу.

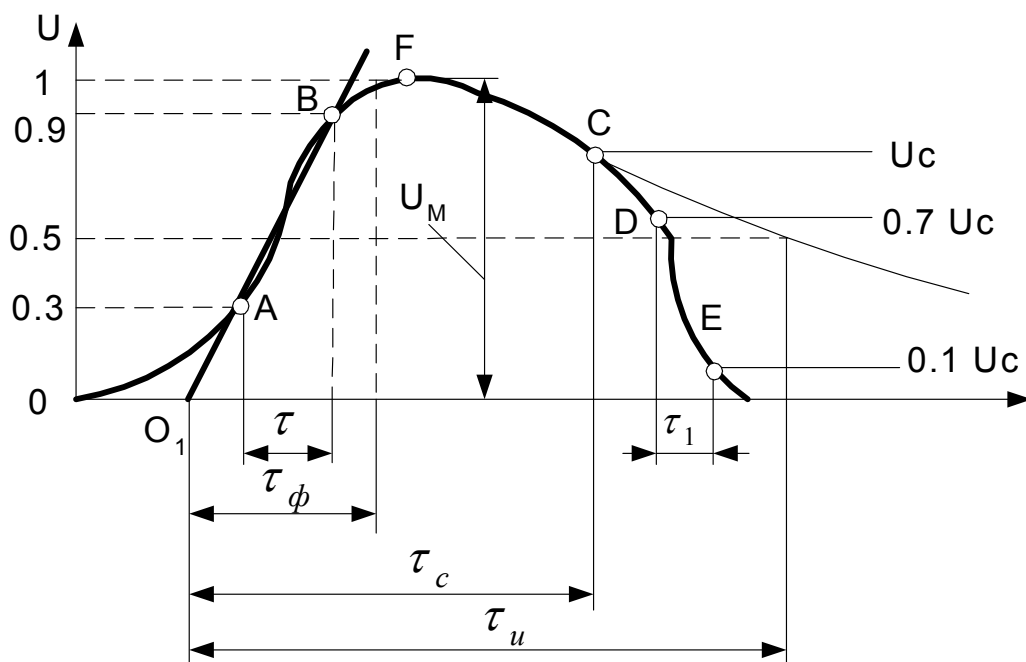


Рисунок 11.5 - Стандартний і зрізаний грозові імпульси

За вимогами МЕК (Публікація 60-3, 1976 р.) амплітудне значення повного імпульсу й імпульсу, зрізаного поблизу амплітуди на спадній частині, повинно вимірюватися з похибкою, що не перевищує 3%. Вимірювання тимчасових параметрів, що визначають форму імпульсу, дозволяється проводити з похибкою не більше 10%, за винятком вимірювання тривалості спаду під час зрізу.

Запис імпульсу високої напруги і вимірювання його амплітуди виконується звичайно за допомогою електронного осцилографа (РО), приєднаного до дільника напруги (ДН) через вимірювальний кабель (ВК). Для вимірювання тільки амплітуди імпульсної напруги використовується кульовий вимірювальний розрядник, підключений замість ДН, чи імпульсний вольтметр, приєднаний через ДН. Принципова схема

установки для випробування імпульсами високої напруги наведена на рисунку 11.6.

У генераторі імпульсів G у заданий момент часу на ємності генератора C_G виникає заряд при високій напрузі. Розрядник F_1 пробивається, і на випробовуваний об'єкт (ВО) через фронтовий опір R_ϕ і провідник ВП потрапляє висока напруга. Після заряджання конденсатора C_ϕ розрядники F_1 розмикаються і конденсатор C_ϕ розряджається через розрядний опір R_p . Фронтна ємність C_ϕ складається повністю чи частково з ємності випробовуваного об'єкта.

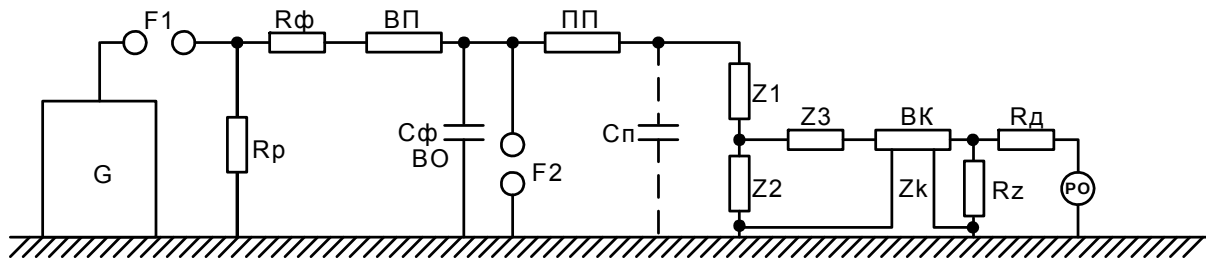


Рисунок 11.6 - Схема установки для випробування імпульсами високої напруги

Через підвідний провід (ПП) напруга підводиться до дільника напруги, що складається з елементів Z_1 і Z_2 . Якщо вимірювальний кабель (ВК) має велику довжину, то він повинен розглядатися як лінія з розподіленими параметрами з хвильовим опором Z_k . Крім того, у схемі є узгоджувальний Z_3 і демпфірувальний R_d опори.

Фронт і тривалість імпульсу можна оцінити за приблизними співвідношеннями:

$$\begin{aligned}\tau_\phi &\approx 2,7R_\phi C_\phi; \\ \tau_n &\approx 0,69C_\phi R_p.\end{aligned}$$

Ємність генератора повинна більш ніж у 10 разів перевищувати ємність C_ϕ .

При вимірюваннях виникають дві проблеми. Перша полягає в передачі з мінімальним перекохуванням вхідного сигналу, що піддається оцінці, (вимірюваної напруги) до пластин, що відхиляють, осцилографа чи імпульсному вольтметру. Друга проблема пов'язана з впливом параметрів ГН, випробовуваного об'єкта і вимірювального ланцюга на значення і форму іспитової напруги. Ці перекохування і впливи підсилюються зі збільшенням напруги і зменшенням тривалості імпульсів.

Дільники напруги можуть складатися з чисто активних опорів, тільки з ємностей і з комплексних опорів, складених з ємностей і паралельно підключених активних опорів. Елементи дільників повинні мати мінімальну індуктивність. Дільники високої напруги мають великі розміри і взаємний електромагнітний вплив окремих елементів, тому розробка

дільників і вимірювальних кіл, що не спотворюють вимірювані імпульси, є складною задачею, докладніше викладення якої наведене в [28].

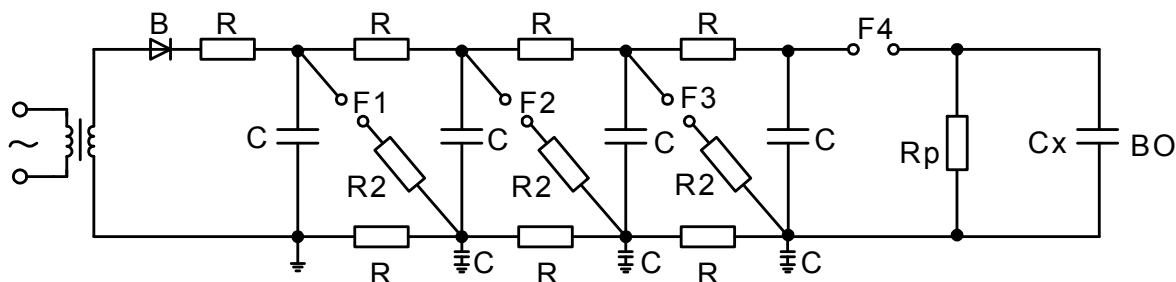


Рисунок 11.7 - Принципова схема генератора імпульсів високої напруги

Принципова схема ГІН показана на рисунку 11.7. Регульована змінна напруга перетвориться за допомогою випрямляча і через опір R конденсатори C заряджаються до заданої напруги. Розрядна напруга розрядників F_1, F_2, F_3, F_4 трохи вища за напруги на конденсаторах. За допомогою спеціального підпалювального електрода, розрядник F_1 пробивається, що призводить до наступного пробоя всіх розрядників. У цей момент конденсатори C виявляються з'єднаними послідовно і напруга на них додається і подається на випробовуваний об'єкт (ВО).

Демпфірувальні опори R_2 запобігають виникненню коливальних процесів, а також беруть участь у формуванні фронту імпульсу.

Ємність послідовно з'єднаних конденсаторів C_i складає ємність ГІН «в ударі» C_G . Енергія хвилі імпульсного генератора дорівнює $C_G U^2 / 2$, кВт·с. Необхідно дотримувати відношення $C_G \geq 10 C_x$, де C_x – ємність ВО.

Безпосередньо перед випробуваннями ГІН повинний бути відградуваний при позитивній полярності в такий спосіб. Обидва кінці випробовуваного кабелю через кінцеві муфти (звичайно довжина кабелю 5 м) приєднують до імпульсного генератора, вимірювальні кулі і дільники напруги залишаються приєднаними до ГІН на увесь час випробувань. Градування повинно бути проведено принаймні для трьох відстаней між вимірювальними кулями, обираними таким чином, щоб розрядні напруги приблизно дорівнювали 50, 65 і 80% необхідного рівня імпульсної міцності випробовуваного кабелю. Для кожної установки кульового розрядника зарядна напруга ГІН встановлюється таким чином, щоб 50% імпульсів викликали розряди на вимірювальних кулях. При градуванні осцилографують форму хвилі імпульсу. Отримана залежність між амплітудою імпульсів і зарядною напругою ГІН повинна бути прямолінійною. Екстраполюючи цю залежність знаходять значення зарядної напруги для одержання імпульсів з необхідною максимальною напругою. Далі виконують програму випробувань, передбачену вимогами МЕК і стандартів.

12 Пропалювання ізоляції силових кабелів

Основним призначенням пропалювання дефектної ізоляції є зниження перехідного опору в місці дефекту, що дозволяє застосовувати відомі методи як для визначення відстані до місця пошкодження кабелю, так і місця безпосередньо на трасі кабельних ліній. Для ефективного визначення відстані до місця пошкодження та самого місця пошкодження потрібно, щоб перехідний опір в місці дефекту був в межах від десятків ом до одиниць кілоом.

Після зниження опору в місцях пошкодження використовується один із найефективніших методів – акустичний.

У випадку неможливості визначення місця однофазного пошкодження на трасі кабельних ліній акустичним методом (сильні акустичні перешкоди, велика глибина прокладання кабелю, відсутність документації на прокладання кабелю і т.д.). Проводять пропалювання місця пошкодження за допомогою силової пропалювальної установки з метою переведення однофазного пошкодження в міжфазне (двофазне). Визначення місця пошкодження в цьому випадку здійснюють індукційним методом.

Пропалювання проводять за рахунок енергії, що виділяється в каналі пробою. При цьому відбувається обуглення ізоляції в місці пошкодження і зниження перехідного опору. Слід відмітити, що пропалювання також дозволяє безпосередньо і просто виявити пошкодження на кінці кабелю та на "прорваних" кабелях за нагрівом, появою диму і запахом горіння. Слід мати на увазі, що ефективне пропалювання має місце лише до тих пір, доки значення опору у місці пошкодження має той самий порядок, як і внутрішній опір пропалювальної установки. Практично неможливо створити пропалювальну установку, яка забезпечує достатньо високу напругу і малий внутрішній опір. Тому єдиним методом пропалювання є ступінчастий спосіб. Суть його полягає в заміні джерела живлення із зниженням напруги пробою і опору в місці пошкодження. Джерело живлення більш низької напруги легше сконструювати з меншим внутрішнім опором. На теперішній час установки мають від 3 до 6 ступенів пропалювання.

Пропалювання може проводитись як на постійному, так і на змінному струмі. Верхні ступені пропалювання виконуються на випрямленій напрузі, а остання ступінь - на змінній напрузі.

Розглянемо три основних випадки пропалювання ізоляції в силових кабелях.

12.1 Пропалювання ізоляції кабельних муфт

В кабельних муфтах виникають пошкодження, викликані дефектом

монтажу, а також дією кліматичних факторів (виникнення тріщин і пустот в мастиці). Даний вид пошкодження виявляється при профілактичних дослідженнях. За допомогою дослідної високовольтної установки на пошкодженій жилі кабелю піднімається напруга до напруги пробою. При цьому після декількох пробойів напруга пробою не знижується або при зниженій напрузі електрична міцність знову збільшується. Такий характер процесу вказує на пошкодження з'єднувальних (і дуже рідко – кінцевих) муфт.

В з'єднувальних муфтах часто утворюються тріщини, пустоти, які відіграють роль так би мовити розрядників у газовому середовищі. Гази утворюються внаслідок розкладення кабельної маси під дією дуги. В момент пробою в таких пустотах тиск різко підвищується, при цьому дуга гаситься. Крім того, розряди на більш довгих, ніж в цілому місці кабелю, шляхах розплавляють кабельну масу, заливаючи канал розряду свіжою масою. Пробой в муфтах носять назву "запливаючий пробой".

Якщо через 5-10 хв. безперервного повторення пробойів розрядна напруга не знижується, пропалювання слід зупинити і, зафіксувавши відстань до місця пошкодження методом коливального розряду, уточнити на трасі місце розташування дефекту муфти індукційно-імпульсним і акустичним методами.

12.2 Пропалювання ізоляції кабелю

При профілактичних випробуваннях пошкодження може бути виявлено безпосередньо в кабелі в цілому місці. При цьому, якщо кабель добре просочений маслом, пробойі можуть повторюватись тривалий час до 5-10 хв., а іноді і довше. Після багаторазового повторювання розрядів напруга пробою починає знижуватися, що дозволяє (при максимальному значенні середнього струму живильної уставки) мати підвищену частоту пробойів. Як тільки напруга пробою знизиться до більш низьких значень, включають пропалювальну установку на верхній ступіні пропалювання. Після того, як виникне осушення та обуглення ізоляції, процес безперервного чергування заряду і розряду в кабелі переходить в стійке протікання струму через місце пошкодження з постійним зниженням перехідного опору. При цьому як тільки вдається знизити напругу пропалювання, необхідно переключити пропалювальну установку на нижчий ступінь пропалювання. В процесі пропалювання опір в місці пошкодження може збільшуватись, і в цьому випадку необхідно повернутися на вищий ступінь пропалювання, щоб домогтись зниження опору в місці пошкодження і напруги пропалювання. На низьких ступенях пропалювання при великих струмах в канал пошкодження потрапляють частки розплавленого металу як жили, так і оболонки кабелю, що викликає значне зниження опору в місці пошкодження. При утворенні суцільного металевого каналу перехідний опір зменшується до часток ома. У випадку,

коли необхідно перевести однофазне пошкодження в міжфазне, використовується схема, зображена на рисунку 12.1.

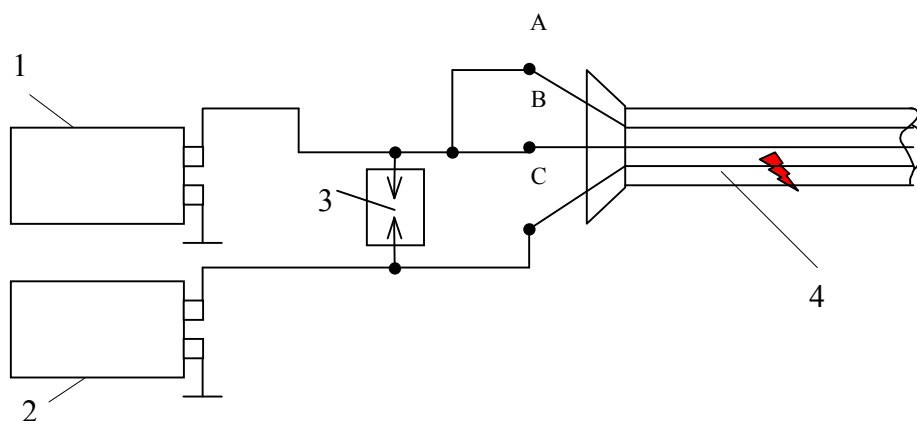


Рисунок 12.1 - Схема підключення обладнання при переході однофазного пошкодження в міжфазне (двофазне):

1 – випробувальна установка постійного струму;
2 – пропалювальна установка; 3 – розрядник; 4 – пошкоджений кабель

З допомогою пропалювальної установки виконується пропалювання ізоляції пошкоджені жили A кабелю. Випробувальна установка постійного струму ввімкнена на дві пошкоджені жили і через розрядник до пошкоджені жили A. Ємність двох жил кабелю заряджається за допомогою випробувальної установки до напруги пробою розрядника, яка встановлюється рівною 5-10 кВ, і імпульс струму розрядника руйнує утворений під дією струму від пропалювальної установки провідний місток в місці пошкодження.

Періодичне утворення за рахунок струму пропалювання і руйнування внаслідок струму розряду ємності двох непошкоджених жил провідного містка збільшує об'єм порушення ізоляції. Наявність напруги випробувальної установки на непошкоджених жилах кабелю у перехідному режимі збільшує ймовірність пробою з цих жил на пошкоджену. У випадку пробою стає неможливим збільшити напругу від випробувальної установки, внаслідок чого перестає спрацьовувати розрядник. Слід відмітити, що не завжди вдається перевести однофазне замикання в міжфазне.

У випадку, коли пропалювання проходить протягом тривалого часу при постійному струмі пропалювальної установки, а опір у місці пошкодження не зменшується і складає близько 1000 – 5000 Ом, пропалювання слід припинити, оскільки місце пошкодження з отвором в оболонці кабелю може знаходитись у воді.

Знизити опір у місці дефекту при таких пошкодженнях не вдається.

12.3 Порушення металевого спаю (зварки) при однофазних пошкодженнях

Якщо через пошкоджену жилу кабелю тривало протікає струм однофазного КЗ на оболонку, то в місці пошкодження можливо зварювання струмоведучої жили з екрануючою оболонкою. Зруйнувати місце зварення пропалюванням часто не вдається, без чого не завжди можна визначити місце пошкодження на трасі кабельної лінії. Для зруйнування місця зварки необхідно скласти схему надсилання високовольтної хвилі від зарядженого конденсатора (рисунок 12.2). Ємність конденсатора вибирається максимальною і при цьому можна підключити до установки ємність непошкоджених жил кабелю. При надсиланні високовольтної хвилі від зарядженого конденсатора за рахунок ударних динамічних зусиль при імпульсному розряді відбувається порушення провідного містка. Але частіше місце зварення є достатньо міцним і цей метод також не дає результату. В цьому випадку для порушення металевого спаю можна використати схему, яка показана на рисунку 12.3. Випрямну установку трифазного струму підключають до пошкоджені жили кабелю на декілька секунд, протягом яких через місце проходження протікає великий струм (до 400 А), що розігріває спай у місці пошкодження і порушує його. Але навіть за допомогою випрямної установки не завжди можливо зруйнувати металевий спай в місці пошкодження, особливо на кабелях ААБ.

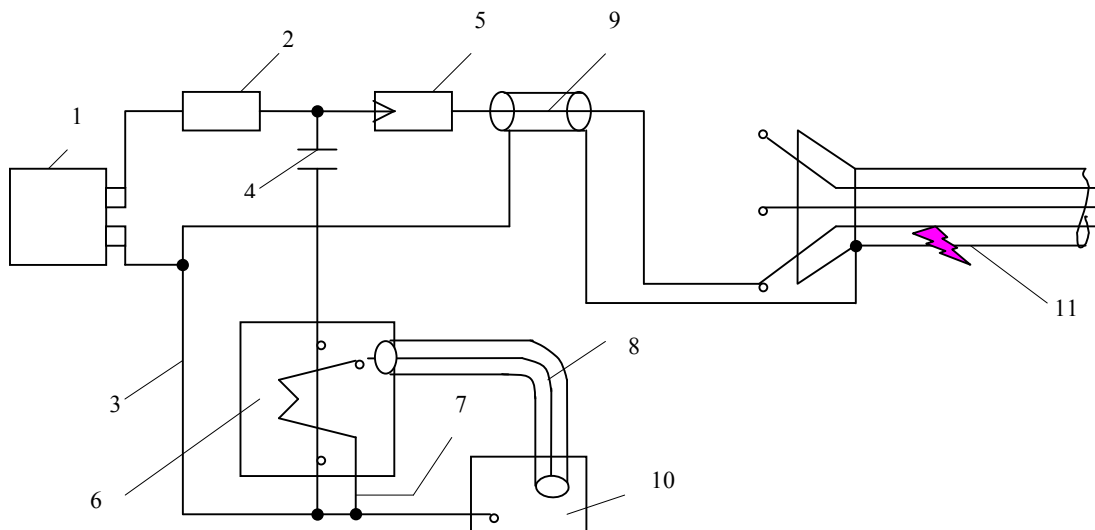


Рисунок 12.2 - Схема з зарядженим конденсатором:

1 – високовольтний випробувальний пристрій; 2 – зарядний резистор; 3 – коло заземлення; 4 – високовольтний конденсатор; 5 – керований розрядник; 6 – приєднувальний пристрій струму; 7 – коло заземлення приєднувального пристрою та вимірювача ЦРО200; 8 – з'єднувальний кабель; 9 – високовольтний екранований кабель; 10 – вимірювач ЦРО200; 11 – пошкоджений силовий кабель

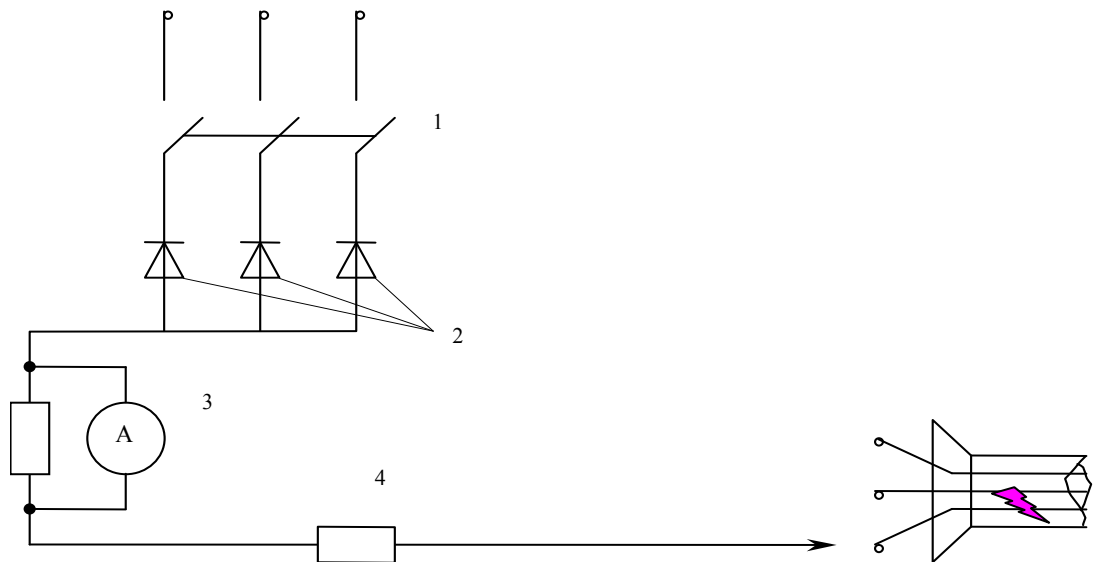


Рисунок 12.3 - Схема під'єднання випрямної установки трифазного струму для зруйнування місця зварення:

1 – вимикач з струмовою уставкою; 2 – випрямлячі;
3 – амперметр; 4 – обмежувальний резистор

13 Методи визначення відстані до місця пошкодження кабельних ліній (відносні методи)

Методи визначення відстані від місця вимірювання (початок кабелю) до місця пошкодження називаються відносними методами. Відносні методи не гарантують високої точності визначення місця пошкодження, але вказують зону, в якій є пошкодження, і дають можливість використовувати в цій зоні абсолютні методи, тобто методи, за допомогою яких безпосередньо можливо визначити місце пошкодження.

13.1 Імпульсний метод

За допомогою імпульсного методу можна виміряти повну довжину кабельної лінії, визначити відстань до місця пошкодження, яке має перехідний опір менше 200 Ом, а також відстань до розриву жил кабелю.

Принцип імпульсного методу полягає в тому, що в пошкоджену кабельну лінію посилають імпульси напруги (зондувальні імпульси), які поширюються по лінії, частково відбиваються від неоднорідностей хвильового опору і повертаються до місця, звідки вони були послані. Схема підключення вимірювача за допомогою імпульсного методу показано на рисунку 13.1. Неоднорідності хвильового опору фіксуються на екрані електронно-променевої трубки.

Неоднорідності виявляються: в муфтах, які з'єднуються кабелями між собою, однофазних і міжфазних пошкодженнях кабелю з перехідним опором в місці пошкодження менше 200 Ом, розтяжках жил кабелю, в кінці кабельної лінії. Імпульсні характеристики кабельної лінії з різними видами пошкодження показані на рисунку 13.2.

При визначенні відстані до місця обриву або вимірюванні повної довжини кабелю відображений сигнал від цих неоднорідностей хвильового опору буде мати полярність посланого зондувального імпульсу, тобто викид буде вверх.

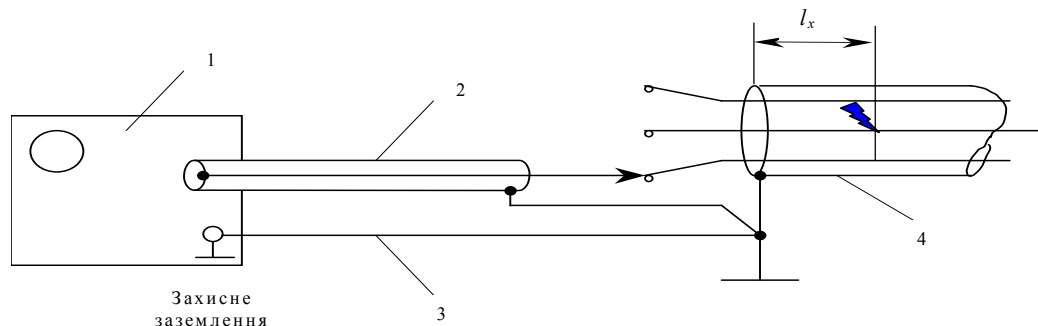


Рисунок 13.1 - Схема підключення вимірювача імпульсним методом:
1 – вимірювач неоднорідностей лінії Р5-10; 2 – з'єднувальний кабель;
3 – провід захисного заземлення; 4 – пошкоджений силовий кабель

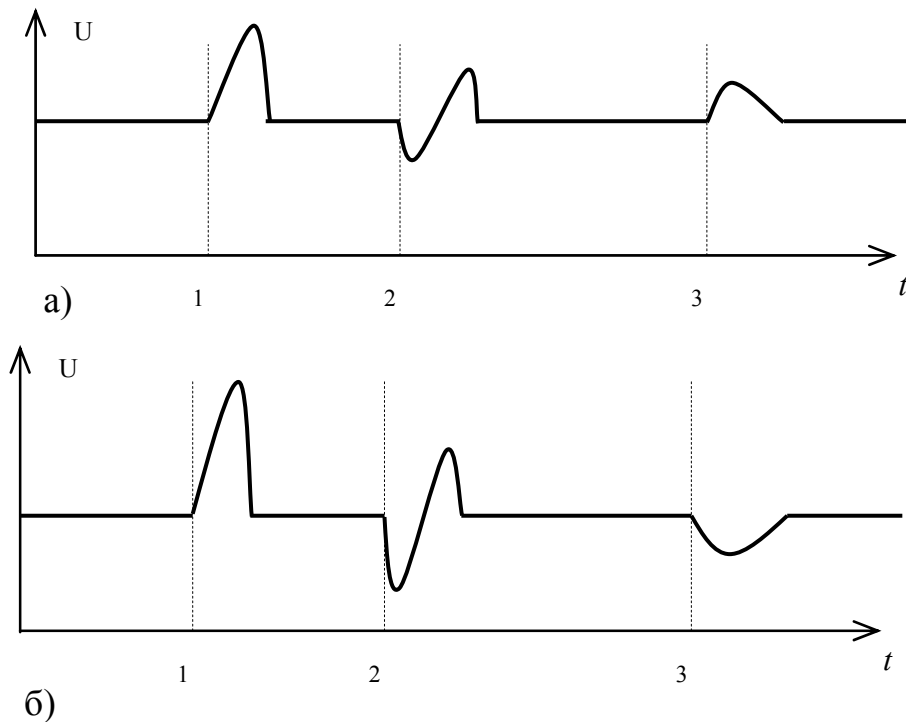


Рисунок 13.2 – Імпульсна характеристика кабельної лінії при:
а) – вимірювані відстані до обриву або повної довжини кабелю;
б) – вимірювані відстані до короткого замикання в кабелі; 1 – початок кабельної лінії; 2 – відбиття імпульсу від муфти; 3 – відбиття імпульсу від обриву або повна довжина кабельної лінії

При КЗ жили кабельної лінії відбитий сигнал від місця КЗ змінює полярність посланого зондувального імпульсу, тобто викид буде вниз. При значних перешкодах підключення вимірювачів здійснюється за схемою пошкоджена жила – здорова жила.

У випадку, якщо неможливо знизити опір у місці пошкодження нижче 200 Ом, можна провести порівняння імпульсних характеристик пошкоджених і непошкоджених жил кабелю.

На тих ділянках імпульсних характеристик, де є помітні зміни, можна вказати про наявність пошкодження. В вимірювачах Р5-10; Р5-11 за допомогою перемикача на електронно-променевій трубці можна помітити імпульсну характеристику будь-якої жили кабелю. В вимірювачах інших модифікацій (Р5-5, Р5-9) порівняння імпульсних характеристик жил кабелю здійснюється перемиканням шланга безпосередньо на шинах кабелю.

13.2 Метод коливального розряду

При визначенні відстані до однофазних місць пошкодження з перехідним опором у місці пошкодження, які дорівнюють десяткам і сотням мегаом ("запливаючий пробій"), використовується метод коливального розряду. Схема під'єднання приладів при визначенні відстані до місця "запливаючого пробію" показана на рисунку 13.3.

За допомогою високовольтної дослідної установки на пошкодженій жилі кабелю збільшується напруга до напруги пробію. КЗ в зарядженій жилі кабелю призводить до появи електромагнітних хвиль, які поширюються в обидві сторони (до початку і до кінця кабельної лінії) від місця пробію до місця дефекту. Епюри напруги коливального процесу при пробіі зарядженої кабельної лінії, зняті на затискачах кабелю, і епюри напруги після диференціювання коливального процесу вхідними колами вимірювача показані на рисунку 13.2. Пробій на трасі кабельної лінії відбувається в момент часу t_0 і починає поширюватись до початку лінії з відомою швидкістю $v = 160$ м/мкс. В момент часу t_1 хвиля досягне початку кабелю і запустить вимірювач. Відбита хвиля досягне місця пробію в момент часу t_2 , відбившись від нього, повернеться до початку кабельної лінії в момент часу t_3 і призведе до зупинення вимірювача. Відстань можна обчислити таким чином:

$$\frac{l_x}{L - l_x} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (13.1)$$

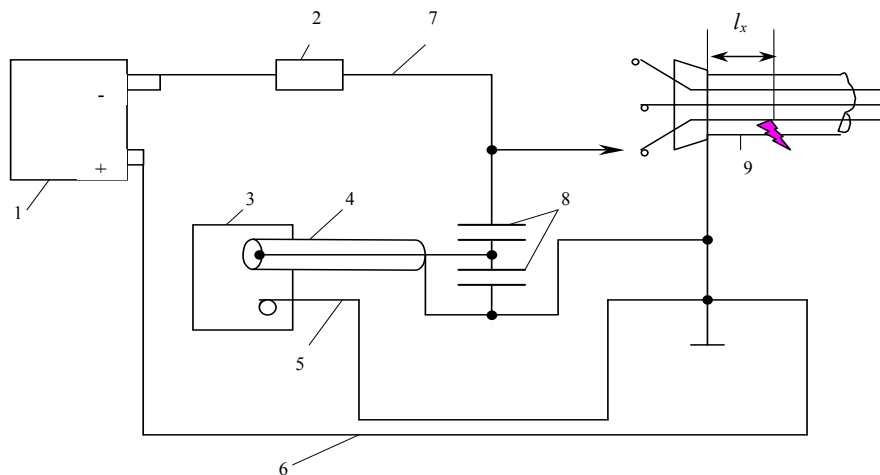


Рисунок 13.3 - Схема під'єднання приладів при вимірюванні відстані до місця "запливаючого" пробію в трифазному кабелі:

- 1 – високовольтна випробувальна установка; 2 – зарядний резистор;
- 3 – вимірювач відстані до місця пошкодження в кабелі ЦРО200;
- 4 – з'єднувальний кабель; 5 – провід захисного заземлення вимірювача;
- 6 – коло заземлення високовольтної випрямляючої установки; 7 – провід високої напруги; 8 – приєднувальний пристрій; 9 – пошкоджений силовий кабель

На епюрі коливального процесу при пробі кабелю видно викиди в момент часу $t_{п1}$ та $t_{п2}$ внаслідок відбиття від неоднорідностей хвильового опору, які можуть викликати хибні спрацьовування вимірювача, що призведе до неправильного вимірювання відстані до місця пробою. Для виключення хибних спрацьовувань у вимірювачах передбачається плавна зміна рівня вхідного сигналу і введення імпульсів затримки, які виключають сигнали перешкод. На теперішній час для вимірювання відстані до місця пробою ("запливаючий пробій") серійно випускається вимірювач відстані до місця пошкодження кабелю ЦРО 200 замість вимірювача Щ4120.

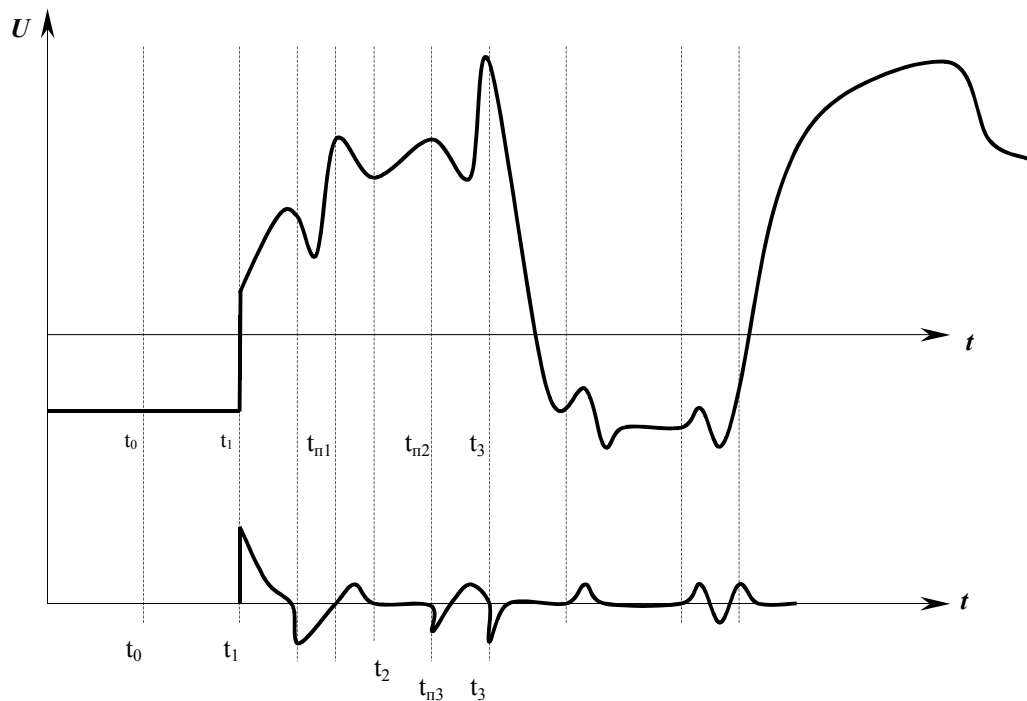


Рисунок 13.4 - Епюри напруг коливального процесу при пробі зарядженої кабелю лінії, які зняті на затискачах кабелю, і епюри напруг після диференціювання коливального процесу вхідними колами вимірювача:

t_0 – час початку пробою в пошкодженій жилі кабелю; t_1 – час надходження електромагнітної хвилі до початку кабелю; $t_{п1}$, $t_{п2}$ – час надходження відбитої від неоднорідності електромагнітної хвилі; t_2 – час надходження відбитої хвилі до місця пробою; t_3 – час надходження до початку кабелю відбитої від місця пробою електромагнітної хвилі

13.3 Хвильовий метод

Хвильовий метод застосовується у випадку, якщо опір у місці пошкодження складає від 100 Ом до сотень кілоом. На рис.13.5 показана схема під'єднання приладів при вимірюванні відстані до місця пошкодження з перехідним опором від одиниць до сотень кілоом при

установленні вимірювача ЦРО 200 і приєднувального пристрою струму в рухомій вимірювальній лабораторії. Відстань до місця пошкодження визначається таким чином.

У випадку, коли опір в місці пошкодження близький до 0, пробій не відбудеться і електромагнітна хвиля буде відбиватись від місця КЗ. Цей процес буде продовжуватись до того часу, поки за рахунок втрат амплітуда електромагнітної хвилі не затухне.

На епюрах (рис. 13.5) показані імпульсні напруги, отримані на виході приєднувального пристрою при пробі в місці пошкодження.

На епюрах видно, що інтервал часу $t_0 - t_1$ між посланим імпульсом і його першим відбиттям не дорівнює інтервалу часу $t_1 - t_2$ між імпульсами першого і другого відбиття хвилі. Це відбувається внаслідок того, що пробій в місці пошкодження кабелю відбувається із затримкою за часом.

Час ΔT може змінюватись залежно від опору в місці пошкодження, від вологості, від іскрового проміжку, від крутизни фронту падаючої хвилі.

Отже, для того, щоб точно виміряти відстань до місця пошкодження слід виміряти часовий інтервал $t_1 - t_2$ або $t_2 - t_3$, або $t_3 - t_4$ і т.д. У випадку, якщо опір в місці пошкодження близький до 0 і пробією в місці дефекту не виникає, можна вимірювати будь-який часовий інтервал між відбитими імпульсами ($t_0 - t_1$; $t_1 - t_2$; і т.д.)

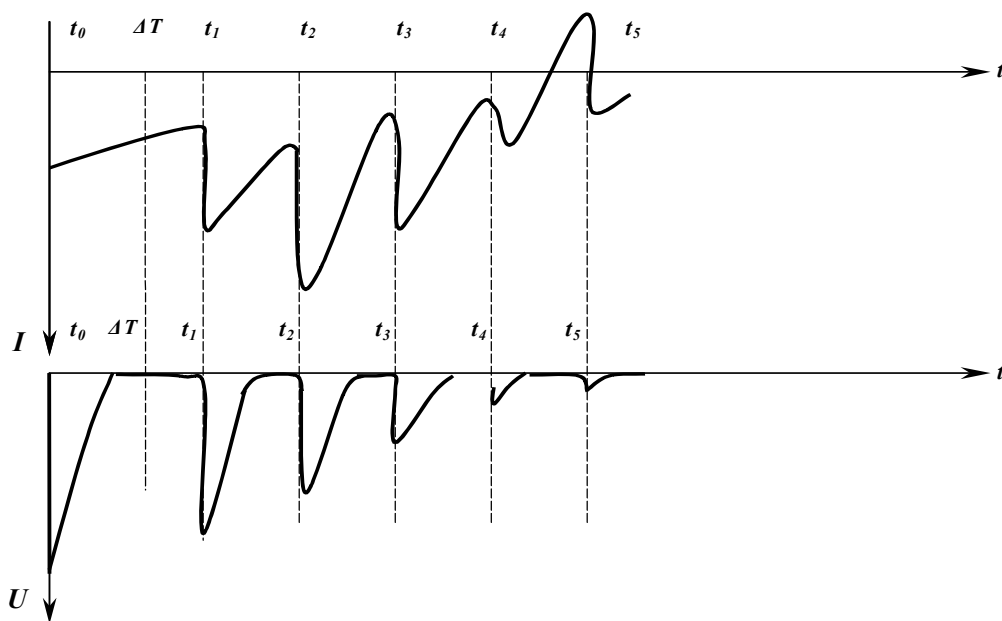


Рисунок 13.5 - Епюри струму в колі конденсатора і епюри напруги на виході приєднувального пристрою:

t_0 – момент часу посилення високовольтної хвилі від зарядженого конденсатора; ΔT – затримка за часом пробією в місці пошкодження; t_1 , t_2 , t_3 , t_4 – момент часу приходу імпульсів струму до початку кабелю, відбитих від місця пошкодження

В кабельних лініях можуть бути значні неоднорідності хвильового опору по довжині лінії, які викликані з'єднанням кабелів різних типів і перерізів, а також з'єднувальними муфтами. Такі неоднорідності викликають додаткові відбиття електромагнітних хвиль, що призводить до неправильних вимірювань.

Неправильні вимірювання внаслідок таких перешкод можуть бути виключені шляхом регульовального зменшення чутливості приладу та шляхом введення регульовальних за часом імпульсів затримки спрацювання схеми приладу як в колі пуску приладу (інтервал часу $t_0 - t_1$), так і в колі зупинення приладу (інтервал часу $t_1 - t_2$).

Для визначення цих видів пошкоджень застосовується вимірювач відстані до місця пошкодження кабелю ЦРО 200, який використовує хвильовий метод і має вище перераховані можливості.

3

13.4 Петльовий метод

При визначенні місця пошкодження захисної пластмасової ізоляції використовується петльовий метод. Схема підключення приладів при використанні петльового методу показана на рисунку 13.6. Необхідною умовою для визначення відстані до місця пошкодження пластмасової захисної оболонки є зняття заземлення кінцевих воронок, повна впевненість в тому, що всі муфти, встановлені по трасі кабелю, ізольовані від землі. В іншому випадку застосувати петльовий метод неможливо.

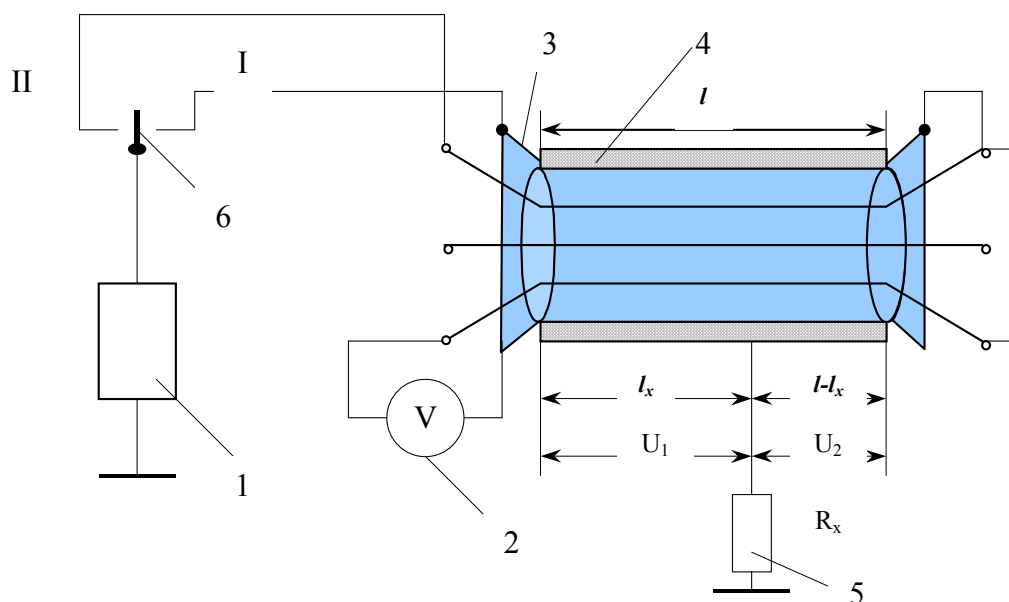


Рисунок 13.6 - Схема підключення приладів і встановлення закороток при використанні петльового методу:

- 1 – генератор постійного струму; 2 – вимірювальний вольтметр;
3 – алюмінієва оболонка; 4 – пластмасова оболонка; 5 – місце

пошкодження пластмасової оболонки; 6 – перемикач

Схема працює таким чином.

Перемикач встановлюється в положення I. Струм від генератора протікає по колу: екрануюча оболонка кабелю (довжина l_x), опір в місці пошкодження і заземлений вивід генератора. При цьому за допомогою вольтметра проводять вимірювання напруги на ділянці l_x (U_1) і покази його записують. Потім перемикач встановлюють в положення II. При цьому струм від генератора буде протікати по колу: непошкоджена жила кабелю, екрануюча оболонка кабелю (ділянка $L - l_x$), опір в місці пошкодження і заземлений вивід генератора. За допомогою вольтметра проводять вимірювання спаду напруги на ділянці $L - l_x$ (U_2).

Складаємо рівняння

$$\frac{l_x}{L - l_x} = \frac{U_1}{U_2}. \quad (13.2)$$

Звідки

$$l_x = \frac{U_1 L}{U_1 + U_2}. \quad (13.3)$$

Точність визначення відстані до місця пошкодження пластмасової ізоляції даним методом невелика і складає $\pm 15\%$ вимірюваної довжини.

14 Методи визначення місця пошкодження на трасі кабельної лінії (абсолютні методи)

14.1 Акустичний метод

Акустичний метод базується на прослуховуванні над місцем пошкодження кабельної лінії звукових коливань, які викликані іскровим розрядом в каналі пошкодження.

Акустичний метод практично універсальний і в багатьох кабельних мережах є основним абсолютним методом. За його допомогою можна визначати пошкодження різного характеру: однофазні і міжфазні замикання з різними перехідними опорами, обрив однієї, двох або всіх жил. В окремих випадках можливе визначення декількох пошкоджень на одній кабельній лінії.

Іскрові розряди, які отримуються у місці пошкодження кабелю, утворюються двома способами.

При "запливаючому пробі", який виявляється при профілактичних випробуваннях, пошкодження, як правило, буває в муфтах. Опір в місці пошкодження великий – одиниці і десятки мегаом. За допомогою випробувальної установки постійного струму (див. рис. 13.3) в пошкодженій жилі збільшується напруга (не більше $5U_{ном}$ – робоча напруга кабелю). Як тільки у місці пошкодження відбувається пробій, визначають відстань до місця пошкодження за допомогою метода коливального розряду. Після першого пробію опір в пошкодженій жилі кабелю відновлюється і напруга від дослідної установки постійного струму збільшується знову до напруги пробію. Така періодичність пробію може тривати довгий час. В зоні вимірної відстані до місця пошкодження оператор, рухаючись вздовж траси кабельної лінії, чітко фіксує акустичні розряди у місці пошкодження.

При замиканнях, які мають перехідний опір у місці пошкодження від одиниць ом до десятків кілоом, складається схема, показана на рисунку 13.1. За допомогою високовольтної установки постійного струму проводиться зарядження конденсатора, після чого через розрядник (розрядник може бути як керований, так і некерований повітряний) високовольтна хвиля посилюється в пошкоджену жилу кабелю, в місці пошкодження якої відбувається пробій, що викликає акустичний сигнал. В пересувній вимірювальній лабораторії є дві групи високовольтних конденсаторів. Одна група на робочу напругу до 5 кВ при ємності до 200 мкФ (низьковольтна акустика), друга група на робочу напругу до 30 кВ при ємності конденсаторів до 5 мкФ (високовольтна акустика). Установки для зарядження конденсаторів першої групи мають велику потужність, яка необхідна для швидкого зарядження конденсаторів великої ємності (одиниці секунд). Для зарядження другої групи конденсаторів застосовують дослідні установки постійного струму. Якщо при роботі від

першої групи конденсаторів неможливо створити пробій внаслідок великого опору в місці пошкодження, то необхідно працювати від другої групи конденсаторів. Оператор, який пересувається вздовж траси кабельної лінії в очікуваній зоні пошкодження, вимірює імпульсним або хвильовим методами, проводить вимірювання таким чином.

При використанні кабелешукача, наприклад, КАІ-80, який має один канал підсилення, сигнал від акустичного перетворювача підсилюється приймачем і надходить на стрілковий індикатор та головні телефони. Рухаючись по трасі кабельної лінії, оператор прослуховує сигнали за допомогою головних телефонів і тільки в місці безпосереднього пошкодження кабелю, коли акустичні сигнали чітко фіксуються, необхідно за допомогою стрілкового індикатора виявити на трасі точку з максимальним відхиленням стрілки, де знаходиться пошкодження. При використанні кабелешукача, наприклад КАІ-90, який має два канали підсилення (один для підсилення сигналів з акустичного перетворювача, а другий для підсилення сигналів, наведених в індукційному перетворювачі від поля електромагнітної хвилі), пошук здійснюється таким чином.

При переміщенні вздовж кабельної лінії сигнал, наведений в індукційному перетворювачі від поля електромагнітної хвилі, який надходить через підсилювальний тракт приймача на стрілковий індикатор, а сигнал з акустичного перетворювача надходить через свій підсилювальний тракт на головні телефони. В результаті чого оператор чітко знає про наявність пробою в місці пошкодження, не прослуховуючи акустичного сигналу, й продовжує рухатись по трасі кабельної лінії до місця пошкодження.

В зоні місця пошкодження, коли стає чути акустичний сигнал в головних телефонах, слід перейти в режим акустичного пошуку. При цьому акустичний сигнал буде надходити через підсилювальний тракт приймача КАІ-90 як на головні телефони, так і на стрілковий індикатор, за яким при максимальному відхиленні стрілки можна знайти точне місце пошкодження. При визначенні місця розриву жил в кабелі високовольтну дослідну установку постійного струму підключають по чергові до однієї з жил або зразу до всіх трьох жил кабелю (рисунок 14.1). При збільшенні дослідної напруги до $5U_{ном}$ за рахунок послабленої ізоляції виникає пробій у місці розриву між однією із жил і оболонкою кабелю. У випадку, якщо пробій у місці пошкодження не відбувається, необхідно встановити закоротку на дальньому кінці кабелю між всіма жилами і оболонкою кабелю. В цьому випадку при збільшенні дослідної напруги пробій виникає між розривом жил кабелю. В обох випадках місце пошкодження знаходиться акустичним методом.

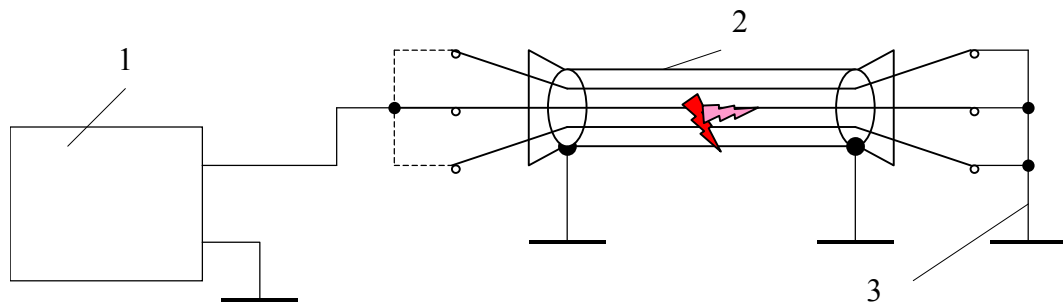


Рисунок 14.1 – Схема під'єднання високовольтної дослідної установки при розриві жил в кабелі:

1 – високовольтна випробувальна установка; 2 – пошкоджений кабель;
3 – закоротка між жилами та оболонкою кабелю

14.2 Індукційно-імпульсний метод

Індукційно-імпульсний метод використовується при визначенні місця пошкодження виду "запливаючий пробій" на трасі кабельної лінії. Визначення і вказання місця пробією в кабелі проводиться методом контролю напрямлення поширення початкового фронту електромагнітних хвиль, які виникли в місці пробією. Оскільки при пробією виникають електромагнітні хвилі, направлені від місця пошкодження до кінця кабельної лінії, то хвилі, що з'явилися, мають різні напрямки поширення відносно місця пошкодження кабелю. Місце на трасі кабельної лінії, в якому відбувається зміна напрямку початкового фронту хвилі, відповідає місцю пошкодження.

Для визначення місця "запливаючого пробією" кабельної лінії до пошкодженої жили кабелю підключають високовольтну установку і плавно збільшують постійну напругу для забезпечення періодичних пробіїв кабелю. Методом коливального розряду проводять вимірювання відстані до місця пошкодження.

Пошук місця пошкодження в знайденій зоні проводиться індуктивно-імпульсним кабелешукачем КІІ-83 або КІІ-89, який переміщають вздовж лінії при створенні в ній періодичних пробіїв.

При кожному пробією в лінії в індукційному перетворювачі (датчику) індукується напруга, яка підводиться до кабелешукача. Кабелешукач визначає полярність початкового фронту і індукованої напруги та фіксує його знак ("плюс" або "мінус").

Визначений знак полярності вказується стріловим вимірювальним приладом кабелешукача протягом часу, достатнього для проведення відліку.

Якщо місце пошкодження буде пройдено, то прилад фіксуватиме другий знак полярності, що є критерієм для повернення назад і точного визначення місця пошкодження кабелю.

Кабелешукачі КІІ-83 і КІІ-89 дозволяють одночасно визначити, в якому напрямку слід вести пошук вздовж траси ліній, щоб наблизитись до місця пошкодження. Це усуває виконання помилкових дій оператором. На трасі кабельної лінії в зоні очікуваного місця пошкодження (при зміні знаку, який показує прилад) доцільно для більш точного визначення місця пошкодження провести вимірювання акустичним методом.

14.3 Індукційні методи

Індукційний метод визначення місця пошкодження базується на принципі уловлення магнітного поля над кабелем, по якому пропускається струм від генератора звукової частоти. Частота струму від 1000 – 10000 Гц. Метод забезпечує високу точність визначення місця пошкодження і набув значного поширення.

Індукційним методом можна визначити: трасу кабельної лінії; глибину прокладання кабельної лінії; шуканий кабель в пучці кабелів; міжфазне пошкодження кабелю; однофазне пошкодження кабельної лінії.

14.3.1 Визначення траси кабельної лінії

При визначенні траси кабельної лінії (рисунк 14.2) генератор звукової частоти включається по схемі фаза-земля.

При використанні частоти 1000 Гц від генератора (рисунк 14.2, а) на віддаленому кінці кабельної лінії встановлюється закоротка між жилою і оболонкою кабелю. При використанні частоти 2000 Гц від генератора (рисунк 14.2, б) установлення закоротки на дальньому кінці кабелю необов'язкове. Корисний сигнал буде чути за рахунок ємнісного струму, який протікає через розподілену ємність кабелю c_k .

При визначенні траси кабельної лінії за рахунок струмів розтікання сигнал, який наводиться в індукційному перетворювачі і підсилюється приймачем, буде дуже добре чути в головних телефонах. Оператор, рухаючись вздовж траси кабельної лінії при горизонтально розташованому індукційному перетворювачі (рис. 14.2, д), чує в головних телефонах над кабелем слабкий сигнал, який посилюється при переміщенні перетворювача вправо або вліво від траси кабельної лінії. Таким чином, при русі за напрямком максимального (при горизонтальному розташуванні) або мінімального (при вертикальному розташуванні) сигналу знаходять трасу кабельної лінії.

Інколи внаслідок розриву оболонки кабелю муфти струм від генератора протікає по оболонках сусідніх кабелів, які знаходяться під робочою напругою. При цьому мінімум звуку утримується над тим кабелем, по якому тече струм розтікання. Внаслідок цього траса кабельної лінії буде визначена невірно. В цьому випадку для усунення хибного визначення кабельної лінії генератор вмикається між двома жилами

кабелю (рис. 14.2, в). Оператор, рухаючись по трасі кабельної лінії, чітко прослуховує максимуми і мінімуми звуку сигналів головних телефонів, які викликані кроком скручення кабелю (крок скручення в силових кабелях може змінюватись від 0,5 до 1,5 м залежно від перерізу жил кабелю).

14.3.2 Визначення глибини прокладення кабельної лінії

Для визначення глибини прокладення кабельної лінії використовується така ж схема підключення генератора, що і для визначення траси кабелю. В місці, де потрібно визначити глибину прокладення кабелю, необхідно точно визначити трасу кабельної лінії при вертикальному розташуванні осі індукційного перетворювача (рисунок 14.2, е). Потім індукційний перетворювач за допомогою фіксуючого пристрою встановлюється під кутом 45° до площини землі. Змінюючи розташування перетворювача перпендикулярно до траси, знаходять точку на поверхні землі, в якій зникає звуковий сигнал в головних телефонах. Відстань від цієї точки до траси дорівнює глибині прокладення кабелю.

14.3.3 Визначення шуканого кабелю в пучці кабелів

Після проведення робіт з розкопки траншей в зоні очікуваного місця пошкодження необхідно (з точки зору техніки безпеки) визначити пошкоджений кабель в пучку інших кабелів, які знаходяться під робочою напругою. Для визначення шуканого кабелю генератора включають на частоті 1000 Гц (рисунок 14.2, в) між двома непошкодженими жилами кабелю, які закорочені на протилежному кінці перемичкою.

В місці розкопки індукційний перетворювач встановлюють у вертикальне положення і, переміщуючи його перпендикулярно до розташованих кабелів, знаходять шуканий кабель за частотою струму і різкою зміною сили звукового сигналу в головних телефонах з двох сторін знайденого кабелю. Для точнішого визначення шуканого кабелю в пучці необхідно застосувати накладну індукційну рамку, яку підключають до входу кабелешукача. Обертаючи її навколо очищеного від землі шуканого кабелю, отримують в головних телефонах два максимуми і два мінімуму сигналу частоти 1000 Гц.

На рисунку 14.2 показано схеми підключення генератора при визначенні траси та глибини прокладення КЛ:

- а) схема визначення траси кабельної лінії на частоті 1000 Гц;
- б) схема визначення траси кабельної лінії на частоті 10000 Гц;
- в) схема визначення траси кабельної лінії при вмиканні генератора на частоту 1000 Гц або 10000 Гц між двома жилами кабелю;
- г) ЕРС, що наводиться в горизонтально розташованому індукційному перетворювачі при переміщенні його вправо або вліво від осі кабелю;

- д) ЕРС, що наводиться в вертикально розташованому індукційному перетворювачі при переміщенні його вправо або вліво від вісі кабелю;
 е) розташування перетворювача при визначенні глибини залягання кабелю.

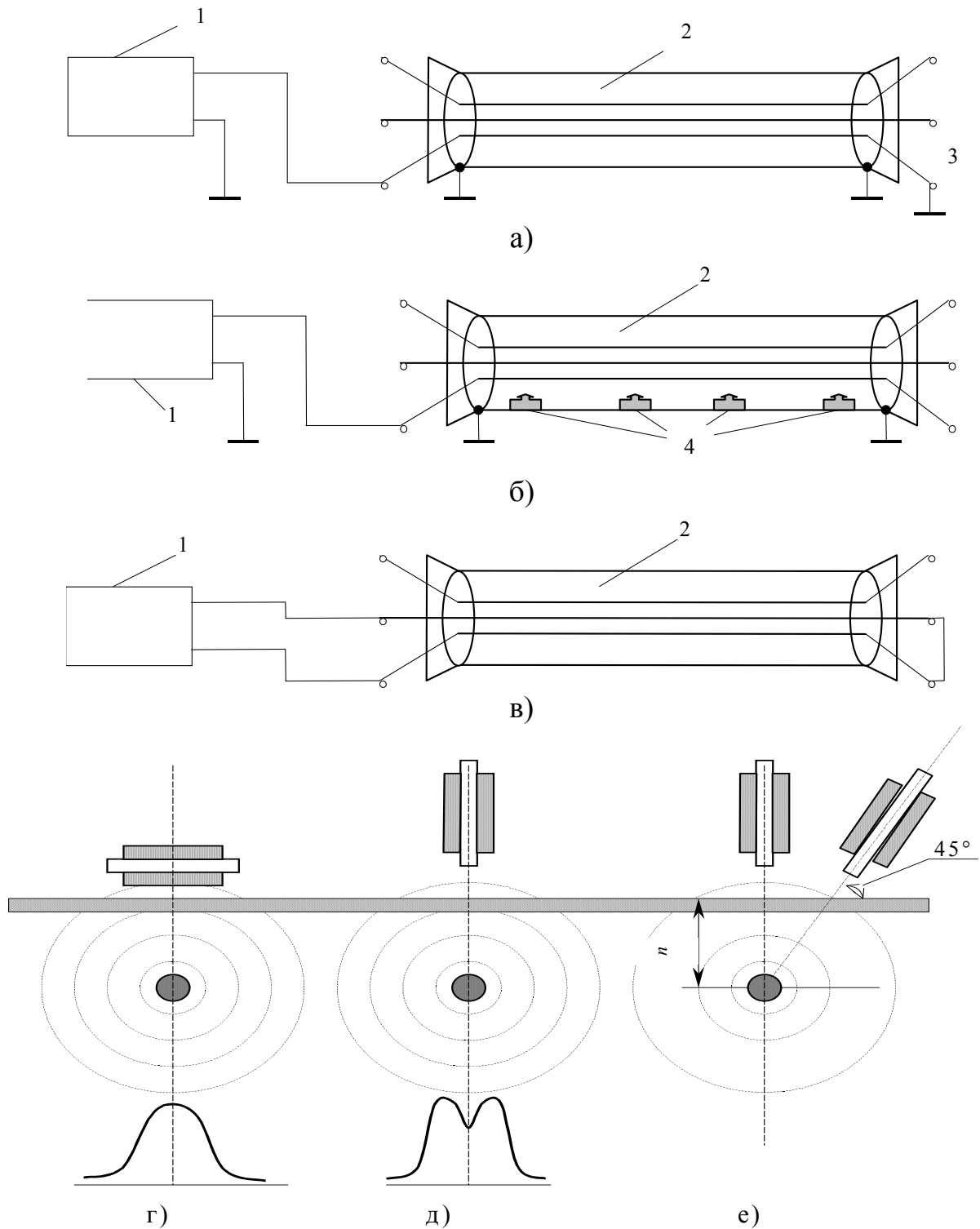


Рисунок 14.2 - Схема підключення генератора при визначенні траси та глибини прокладення КЛ:

1 – генератор; 2 – кабельна лінія; 3 – закоротка;
 4 – розподілена ємність кабелю

14.3.4 Визначення місця міжфазного пошкодження кабельної лінії

Міжфазне пошкодження кабельної лінії, як правило, отримують із однофазних пошкоджень шляхом порушення ізоляції непошкодженої жили. При важкості визначення місця однофазного пошкодження (погана чутливість при акустичному ударі, немає чіткої зміни сигналу при визначенні однофазного пошкодження індукційним методом, немає чіткої прив'язки по довжині кабельної лінії і т.д.) виконують його переведення в між-фазне пошкодження за допомогою пропалювальної установки. Слід врахувати при пропалюванні, що опір між жилами і оболонкою або між двома жилами повинен бути близьким до нуля. У випадку, якщо у місці замикання двох жил опір складає одиниці ом і більше, на трасі кабельної лінії можна отримати помилку при визначенні місця пошкодження особливо на частоті 1000 Гц через ємнісний струм, який буде протікати через місце пошкодження. При цьому по трасі кабельної лінії у місці пошкодження буде прослуховуватись сигнал в головних телефонах від шагу скрутки. Після підготовки пошкодженого кабелю і вимірювання відстані до місця пошкодження за допомогою приладів, використовуючи імпульсний метод, генератор підключають до двох пошкоджених жил кабелю.

Після під'єднання генератора і узгодження навантажень можна виконувати роботи з пошуку місця пошкодження на трасі кабельної лінії.

При такій схемі підключення від генератора до місця пошкодження протікає пара струмів, яка створює у кабелі магнітне поле. При переміщенні вздовж кабельної лінії (до місця пошкодження) це магнітне поле через наявність скручення жил повертається навколо осі кабелю, переміщуючись по спіралі. Завдяки цьому ЕРС, що наводиться в індукційних перетворювачах і відповідно в головних телефонах, буде мати мінімальне та максимальне значення. Відстань між максимумами і мінімумами може змінюватись від 0,5 – 1,5 м. Над місцем міжфазного пошкодження при малому опорі між жилами чутність прийманого сигналу збільшується, а за місцем пошкодження сигналу від кроку скручення практично не чути. При переміщенні над кабелем в місці розташування муфти довжина інтервалу з максимальним звучанням збільшується, при цьому чутність сигналу буде вищою за рахунок великої відстані між жилами в муфті (рисунок 14.3, б). За цими ознаками визначається розміщення муфти кабелю. При переміщенні по трасі кабельної лінії чутність прийманого сигналу може змінюватись через змінення глибини (рисунок 14.3, в) прокладення кабелю (при цьому прийманий сигнал буде плавно змінювати свою чутність аж до зникнення); чутність змінюється, якщо кабель прокладений через комунікації або автомагістралі в металевій трубі (при цьому чутність сигналу від кроку скручення припиняється відразу). Слід вказати, що при проходженні кабельної лінії по трасі через ділянки з різними конструкціями кабелів (наприклад, кабель АСБ з'єднано

за допомогою муфти з кабелем ААБ) ЕРС, що наводиться в індукційному перетворювачі, буде різною: над кабелем ААБ вона буде меншою, ніж над кабелем АСБ або СБ. Це відбувається внаслідок того, що кабель ААБ має краще екранування. Зменшення сигналу після муфти створює враження, що місце пошкодження знайдено. Щоб уникнути помилки, потрібно після зменшення сигналу збільшити чутливість приймача і прослухати зону кабельної лінії з пониженим сигналом.

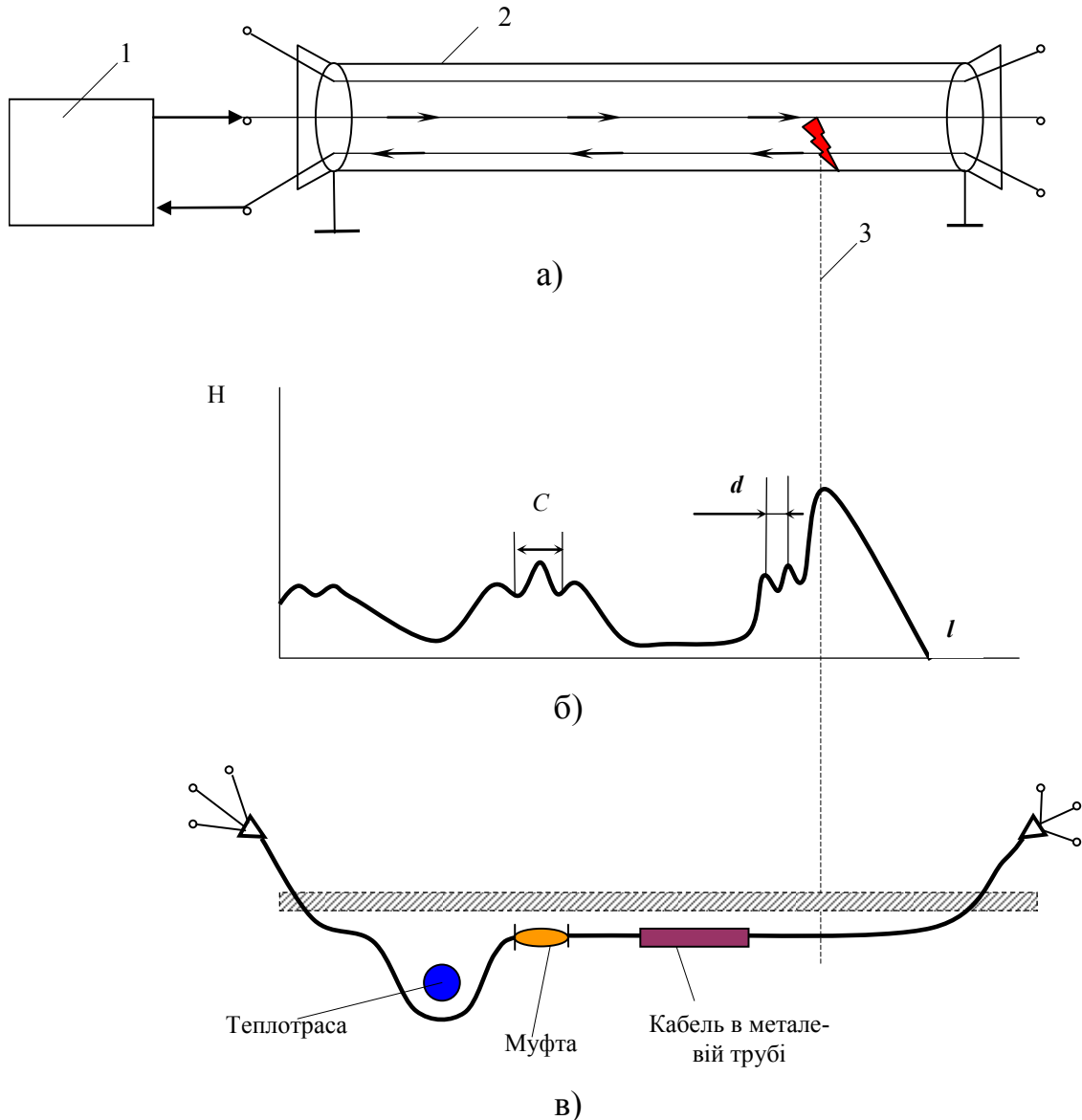


Рисунок 14.3 - Визначення місця міжфазного пошкодження індукційним методом

а) схема приєднання генератора звукової частоти: 1 – генератор звукової частоти; 2 – пошкоджений кабель; 3 – місце міжфазного пошкодження кабелю;

б) крива зміни напруженості електромагнітного поля по трасі кабелю з міжфазним замиканням жил (остаточний опір в місці пошкодження); d – крок скручення жил кабелю; $d \neq c$ на ділянці розташування муфт;

в) траса закладення пошкодженого кабелю.

Коли в головних телефонах прослуховуються максимуми і мінімуми прийманого сигналу, тоді пошкодження слід шукати далі по трасі кабельної лінії. При роботі в зоні сильних електромагнітних перешкод, які викликані струмами промислової частоти 50 Гц (повітряні лінії, трансформаторні підстанції, діючі лабораторні лінії, і т.д.), слід перейти на частоту 10000 Гц, при цьому вплив поля частоти 50 Гц буде зменшено.

14.3.5 Визначення однофазних пошкоджень кабелю (метод “аномалії нуля”)

Метод “аномалії нуля” використовується в тих випадках, коли іншими методами неможливо визначити місце однофазного пошкодження, наприклад, через велику глибину прокладання кабелю, через сильні акустичні перешкоди і т.д., а також неможливість перевести однофазне пошкодження в міжфазне. Цим методом можна визначити місце пошкодження приблизно в 50% випадків. При використанні даного методу за допомогою пропалювальної установки намагаються отримати опір у місці пошкодження декілька десятків ом, але при цьому потрібно не приварити жилу до оболонки кабелю. В окремих випадках “аномалії нуля” можна визначити однофазне пошкодження, яке має опір в місці дефекту, близький до нуля (“глуха земля”). Генератор на частоті 1000 або 10000 Гц підключається до пошкодженої жили і оболонки кабелю. Оператор, рухаючись по трасі кабельної лінії в зоні місця пошкодження з вертикально розташованим індукційним перетворювачем, чує в головних телефонах мінімальний сигнал. Справа або зліва від траси кабельної лінії сигнал збільшується. За допомогою ручки регулювання чутливості індикатора встановити точно над трасою кабельної лінії мінімальні покази індикатора. Його стрілка повинна бути в діапазоні, що не перевищує 20% довжини шкали. При переміщенні точно над трасою кабельної лінії над місцем пошкодження відбудеться різке збільшення показів індикатора, при цьому чутність сигналу в головних телефонах не зміниться. Після проходження місця пошкодження покази індикатора будуть такими, як і до місця пошкодження. При використанні даного методу слід точно знати розташування з'єднувальних муфт, оскільки вони, як правило, дають хибне збільшення сигналу. Збільшення сигналу може бути і в непошкодженій частині кабельної лінії, при цьому слід пройти далі по лінії, де можуть також чергуватись збільшення і зменшення сигналів, які вимірюються індикатором приладу. В цьому випадку пошкодження знаходиться в останній точці збільшення сигналу.

14.4 Визначення місця пошкодження в ізолювальній пластмасовій зовнішній оболонці кабелю

Місце пошкодження в ізолювальній пластмасовій зовнішній

оболонці кабелю можна визначити контактним методом (метод крокового потенціалу) тільки у випадку, коли всі муфти і кінцеві воронки не зв'язані з землею (не заземлені) – рисунок 14.4.

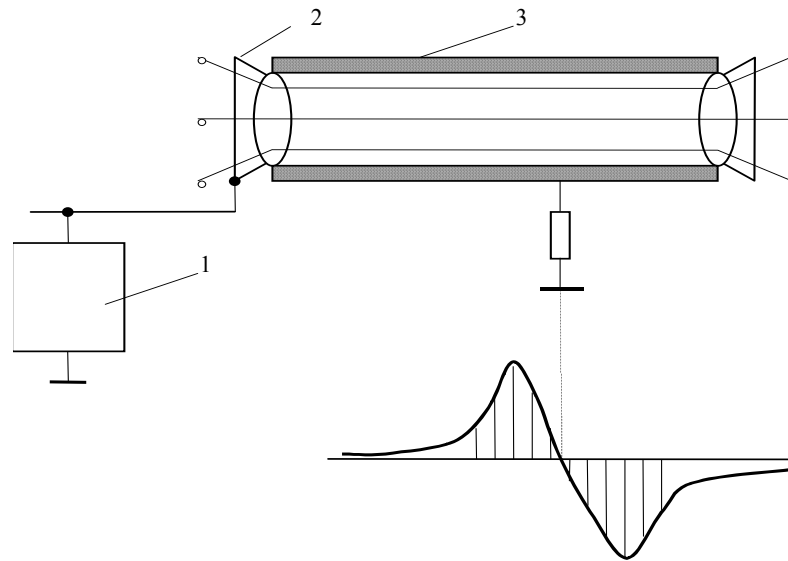


Рисунок 14.4 - Схема приєднання генератора постійного, імпульсного або змінного струму при потенційному методі та зміна показів приладу по трасі кабельної лінії:

1 – генератор; 2 – екрануюча оболонка кабелю; 3 – ізолююча пластмасова оболонка кабелю.

Генератор постійного, змінного або імпульсного струму вмикається між екрануючою оболонкою та колами заземлення, і оператор повинен починати виміри з точки траси, яка завідомо знаходиться до місця пошкодження. За допомогою зондів (контактні стержні при використанні генератора постійного струму, контактні пластини при вмиканні генератора змінного та імпульсного струму), рознесених між собою на відстані від 50 до 100 м, оператор проводить вимірювання (гальванометром на постійному струмі, мілівольтметром на змінному струмі та імпульсним вольтметром при імпульсному струмі) різниці потенціалів на поверхні землі, переміщуючись вздовж траси кабельної лінії. До місця пошкодження стрілки вимірювальних приладів будуть відхилятися в одну сторону, за місцем пошкодження - в іншу сторону, а безпосередньо в місці пошкодження відхилення стрілки від середнього положення не буде. Прилад для визначення місця пошкодження в ізолювальній пластмасовій зовнішній оболонці кабелю розроблений в ВНПЕ.

15 Обладнання і прилади, які необхідні для визначення місця пошкодження силових кабелів

1. Дослідна установка постійного струму з плавним змінням напруги від 0 до 70 кВ.
2. Пропалювальна установка постійного струму з плавним і ступінчастим перемиканням вихідної напруги. Максимальна напруга пропалювання 10 кВ.
3. Установка для посилення високовольної хвилі від зарядженого конденсатора. Максимальна вхідна напруга при ємності конденсатора 200 мкФ дорівнює 5 кВ.
4. Генератор звукової частоти 1000 Гц і 10000 Гц з вихідною потужністю від 200 до 500 Вт.
5. Вимірювач неоднорідності лінії Р5-9, Р5-10, Р5-11.
6. Вимірювач відстані від місця пошкодження кабелю ЦРО200 або Щ4120.
7. Комплекс акустичного та індукційного кабелешукача КАИ-80, ГК-80 або КАИ-90, ГК-90.
8. Комплект апаратури КИИ-83 або КИИ-89.
9. Мегомметр Ф4100.
10. Омметр.
11. Керований або некерований розрядник.

Словник найуживаніших термінів

Антикорозійні покриття – anticorrosive coating
Блукаючий струм – stray current
Дефект – defect
Допустимі струми – acceptable currents
Екранування – screenig
Експлуатація – exploitation
Електричний пробій – electropuncture
Електрохімічна корозія – electrochemical corrosion
Захисне покриття – protective coating
Ізоляція кабельної лінії – insulator of cable line
Кабельний ввід – cable entry
Контроль навантаження – load monitoring
Корозійна активність – corrosiveness
Магістральна лінія – main feed
Муфта – box
Опір ґрунту – ground resistanse
Плановий обхід – scheduled round
Поправкові коефіцієнти – correction factors
Потенціометр – potentiometer
Пошкодження – failure
Пропалювання кабелю – burning of cable
Профілактичні випробування – preventive test
Режим нейтралі – regime of midpoint conductor
Ремонт лінії –line repairing
Спад напруги – voltage drap
Силовий кабель –power cable
Старіння ізоляції –insulation ageing
Струмове навантаження – current load
Струмоведучі жили – conductive parts
Сушіння ізоляції – drying of isolation
Тепловий опір – heat-resistance
Тепловий режим – heating rate
Термопара – thermocoupe
Технічна документація – tehnological documents
Технічне завдання – objective
Технічний нагляд – engineering supervision
Траншея – trench

ЛІТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Рязанов И. Б., Кранихфельд П. И. Теория, расчет и конструирование кабелей и проводов. – М.: Высшая школа, 1972.
3. Баранов Б. М. и др. Сооружение и эксплуатация кабельных линий. – М.: Энергия, 1974. – 632 с.
4. Шалыт Г. М. Определение мест повреждения в электрических сетях. – М.: Энергоатомиздат, 1982.
5. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / Под ред. Баумштейна И. А. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.
6. Блок В. М. и др. Пособие к курсовому и дипломному проектированию для энергетических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1990.
7. Приверзенцев В. А., Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. – М.: Энергия, 1970.
8. Инструкция по эксплуатации силовых кабельных линий. Часть первая. – М.: Служба передового опыта и информации Союзтехэнерго, 1980.
9. Смирнов Л. П. и др. Сооружение и эксплуатация кабельных линий –2-е изд. – М.: Энергия, 1974.
10. Правила безпечної експлуатації електроустановок. – К., 1998. – 138 с.
11. Макиенко Г. П., Попов Л. В. Сооружение и эксплуатация кабельных линий высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с., ил.
12. Базуткин В. В. и др. Техника высоких напряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 464 с., ил.
13. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 288 с.
14. Шабанов В. А. Некоторые особенности эксплуатации силовых кабелей // Энергетик. – 2006. – №3. – С.34.
15. Козлов Д. Е. Использование компактных систем BAUR для испытания и поиска мест повреждений кабельных линий// Энергетик. – 2006. – №4. – С.4.

Навчальне видання

Микола Олександрович Головатюк
Василь Олександрович Леонтєв
Володимир Андрійович Видмиш

ЕКСПЛУАТАЦІЯ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Оригінал-макет підготовлено Головатюком М. О.
Редактор Т. О. Старічек

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

Підписано до друку
Формат 29,7×42 1/4
Друк різнографічний
Тираж прим.
Зам. №

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

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