

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

(повне найменування закладу вищої освіти)

Ультет автоматизації та енергетики
Кедра інформаційно-вимірювальних технологій та енергетичного менеджменту
Пітній рівень магістр
Спціальність інформаційно-вимірювальні технології
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІВТЕМ

Цих В.С.

« » 20 року

**ЗАВДАННЯ
НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ**

Фургалу Володимиру Степановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

роботи Розробка стенду для метрологічного аналізу роботи тахометра

Керівник роботи Піндус Н.М., к.т.н. доцент каф. ІВТЕМ,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Заджені наказом закладу вищої освіти від "05"12 2025 року № 752/7

рок подання студентом роботи 2025 року

існі дані до роботи: Технічний опис роботи приладу для вимірювання частоти

обертання

іст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

сновни вимірювання частоти обертання

ис та будова розробленого лабораторного стенду

етрологічний аналіз роботи тахометра SE-100 із застосуванням концепції

значеності Висновок Перелік посилань та джерела

ерелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

МТТм – 15.00.00.001 – Структурна схема тахометра;

МТТм – 15.00.00.002 – будова тахометра SE-100;

МТТм – 15.00.00.003 – Схема чотирьохрівневого діагностичного дослідження

стральних газопроводів

МТТм – 15.00.00.004 – Таблиця встановлення відповідності специфікації

ження даних досліджень;

МТТм – 15.00.00.005 – джерела похибки при визначенні пошкодження

вної кабельної мережі

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормо-контроль	Чуйко М.М., доцент каф. ІВТЕМ		
Консультант			

7. Дата видачі завдання _____ .2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Термін виконання етапів роботи	Приміт
1.	Вступ	10.11.- 13.11.2025	
2.	Основи вимірювання частоти обертання	14.11.- 23.11.2025	
3.	2 Опис та будова розробленого лабораторного стенду	30.11.- 09.12.2025	
4.	3 Метрологічний аналіз роботи тахометра SE-100 із застосуванням концепції невизначеності	10.12.- 17.12.2025	
5	Редагування пояснювальної записки	19.12- 23.12.2025	

Студент _____

(підпис)

Фургалу В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____

(підпис)

Піндус Н.М.

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Основи вимірювання частоти обертання.....	7
1.1 Методи та засоби вимірювання частоти обертання та ряд інших характеристик.....	7
1.1.1 Принцип дії тахометра	7
1.1.2. Електричні методи.....	9
1.1.3 Механічні методи.....	12
2 Опис та будова розробленого лабораторного стенду.....	20
2.1 Будова та принцип дії лабораторної установки	20
2.2 Будова, структурна схема та принцип дії тахометра «SE-100».....	21
2.2.1 Основні технічні характеристики тахометра SE-100.....	21
2.2.2 Будова та робота тахометрів	22
2.2.3 Підготовка тахометра до роботи виконання вимірювань	24
2.3.1 Вимірювання частоти обертання за допомогою тахометра.....	25
2.3.2 Практичне вимірювання частоти обертання та обробка результатів вимірювання за допомогою тахометра.....	29
3 Метрологічний аналіз роботи тахометра SE-100 із застосуванням концепції невизначеності	36
3.1 Загальна інформація про теорію невизначеності.....	36
3.2 Розрахунок невизначеності вимірювання частоти тахометром SE – 100	41
3.2.1 Розрахунок невизначеності похибки від відстані	43
3.2.2 Розрахунок невизначеності від кута спостереження.....	51

3.2.3 Бюджет невизначеності.....56

ВИСНОВКИ.....60

СПИСОК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА.....61

РЕФЕРАТ

Магістерська робота: «Розробка стенду для метрологічного аналізу роботи тахометра» Фургало В.С., ІФНТУНГ, 2025, 61 с., 8 рис., 40 табл., 12 джерел

Об'єкт дослідження – тахометр «SE-100» та лабораторний стенд для вимірювання частоти обертання.

Мета роботи – розробка лабораторного стенду для вимірювання частоти обертання безконтактним способом, метрологічний аналіз вимірювання частоти обертання тахометром «SE-100».

В даній магістерській роботі проаналізовано основні методи і засоби для вимірювання частоти обертання. В процесі роботи було розроблено лабораторний стенд для вимірювання частоти обертання безконтактним способом. Проведено розрахунок сумарної та розширеної похибки вимірювання частоти обертання.

ЧАСТОТА ОБЕРТАННЯ, ВИМІРЮВАННЯ, ТАХОМЕТР,
ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД.

ABSTRACT

Master's thesis: «Development of a stand for metrological analysis of the rotation of the tachometer» Furgalo V.S., IFNTUNG, 2025, 61 pp., 8 figures, 40 tables, 12 sources

Research object – tachometer «SE-100» and laboratory stand for measuring rotation frequency.

The purpose of the work – is the development of a laboratory stand for measuring the rotation frequency by a non-contact method, metrological analysis of measurement of the rotation frequency with a tachometer «SE-100».

In this master's thesis, the main methods and means for measuring rotation frequency were analyzed. In the process of work, a laboratory stand was developed for measuring rotation frequency by a non-contact method. The calculation of the total and standard error of measuring the rotation frequency was carried out.

ROTATION FREQUENCY, MEASUREMENT, TACHOMETER, LABORATORY STAND.

ВСТУП

На сьогоднішній день економічна стабільність будь-якої країни безпосередньо залежить від стану інфраструктури транспортування енергоресурсів, до якої належать нафтогазопроводи та електричні мережі. Безперебійне функціонування цих комунікацій є запорукою ефективної роботи промисловості та забезпечення належного рівня життя громадян.

Активний розвиток гідро- та атомної енергетики в Україні протягом останніх десятиліть став поштовхом до розбудови розгалуженої системи наземних і підземних ліній електропередач. Ці мережі забезпечують постачання електроенергії як внутрішнім споживачам, так і на експорт.

Станом на початок 2010 року загальна протяжність підземних кабельних ліній в Україні досягла 468,2 тис. км. З цього обсягу на силові мережі припадало 384 тис. км, а на лінії управління та автоматики — 84,2 тис. км.

Одним із ключових викликів у сфері транспортування електроенергії є підвищення надійності та продовження ресурсу роботи підземних мереж. Це зумовлено тим, що значна частина інфраструктури (понад 30%) експлуатується вже 30–40 років, що часто перевищує нормативні терміни. За цей час кабелі зазнавали впливу агресивних факторів: механічних пошкоджень, корозії, ерозії та зсувів ґрунту, змін хімічного складу землі, впливу ґрунтових вод та блукаючих струмів. Основним захистом жил від корозії слугує ізоляційне покриття, а від електричних завад — екранування.

Проте в процесі тривалої експлуатації зовнішня ізоляція руйнується, і внутрішні шари не завжди здатні вберегти метал від корозійних процесів.

Ситуація ускладнюється тим, що технічна документація на старі мережі часто втрачена або збереглася лише частково. Додатковою проблемою є зміна фактичного розташування кабелів внаслідок руху ґрунтів: відхилення від початкових планів може сягати 20 метрів, що робить пошук комунікацій вкрай складним навіть за наявності карт. Подібні проблеми з відсутністю

документації характерні й для кабелів систем автоматики та управління технологічним обладнанням.

З огляду на це, питання оперативного пошуку кабельних трас та локалізації пошкоджень набуває особливої актуальності для проведення ремонтних робіт.

Для забезпечення швидкого та якісного обслуговування підземних мереж необхідно знати не лише їх маршрут, але й точні місця дефектів. Вирішенням цієї проблеми є створення приладу, здатного виявляти підземні комунікації, ідентифікувати їх тип (розрізняти кабелі та трубопроводи), визначати траєкторію пролягання, глибину залягання, а також характер наявних пошкоджень.

1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У НАЗЕМНИХ ТА ПІДЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Загальна довжина підземних силових кабельних мереж у нафтогазовому комплексі України сягає близько ста тисяч кілометрів. Від їхньої справності безпосередньо залежить стабільна робота всієї енергетичної галузі — від видобутку до постачання ресурсів. У зв'язку з цим критично важливим завданням є швидке і точне виявлення місць пошкоджень. Це дозволяє мінімізувати час простою обладнання, зменшити аварійність та знизити ризик виробничого травматизму, пов'язаного з ураженням електричним струмом.

Процес локалізації пошкоджень у силових мережах є складною і тривалою операцією, яка входить до щоденних обов'язків диспетчерських служб. На сьогодні досягнуто значного прогресу в діагностиці ліній напругою 110—750 кВ. Однак розподільні мережі напругою 35 кВ і нижче, а також мережі постійного струму мають специфічні відмінності, що унеможлиблює ефективне використання методів, розроблених для високовольтних магістралей.

Для мереж класу 6—20 кВ характерна складна розгалужена структура, що секціонується роз'єднувачами та вимикачами навантаження. Струми замикання на землю в таких системах зазвичай невеликі і часто значно поступаються струмам навантаження. При цьому параметри нульової послідовності залежать не стільки від місця замикання, скільки від перехідного опору в точці пошкодження. Додатково ускладнює діагностику те, що такі мережі часто монтуються з провідників різних марок і перерізів, а також можуть мати змішану конструкцію, поєднуючи повітряні та кабельні ділянки.

1.1 Загальна характеристика методів виявлення пошкоджень у наземних та підземних кабельних мережах

Процес пошуку дефектів у кабельних мережах зазвичай виконується за визначеним алгоритмом. Вибір необхідного обладнання залежить від призначення ліній (силові, зв'язку або управління) та умов їх розміщення (у ґрунті, шахтах, метрополітені тощо).

Усі пошкодження класифікують як стійкі або нестійкі. До стійких відносять короткі замикання та обриви, характерною рисою яких є стабільний опір, що не змінюється з часом. Нестійкі пошкодження, такі як зволоження ізоляції або «запливаючі» пробої, відрізняються тим, що їхній опір може коливатися під дією зовнішніх факторів, наприклад температури чи напруги.

Для надійного виявлення місця аварії рекомендується поєднувати дистанційні та топографічні методи. Загальна процедура складається з кількох етапів: визначення пошкодженої ділянки, пропалювання ізоляції, дистанційна локалізація та точне топографічне виявлення точки дефекту.

Пропалювання ізоляції є важливою підготовчою операцією. Більшість пошукових методів ефективні лише за умови низького перехідного опору в місці пошкодження, тому це завдання виконують спеціальні установки, які знижують опір до мінімальних значень.

Дистанційні методи поділяються на високочастотні (імпульсний, метод стоячих хвиль) та низькочастотні (петлевий). Топографічні методи, своєю чергою, базуються на індукційному, акустичному або потенційному принципах.

Пропалювання вважається найбільш трудомістким етапом. Залежно від обраного методу подальшого пошуку, воно має різну мету: для індукційного методу необхідно створити стійкий металевий контакт між жилою та оболонкою, а для акустичного — навпаки, зруйнувати провідний місток.

У кабелях із паперово-масляною ізоляцією процес пробою

супроводжується газовиділенням та утворенням порожнин. Багаторазові розряди призводять до обвуглювання каналу пробою. Якщо необхідно створити металеве з'єднання для індукційного пошуку, використовують струми великої сили, які виплавляють метал жили та оболонки, формуючи провідний шлях.

1.2 Дистанційні методи виявлення пошкоджень у підземних кабельних мережах

Після завершення процедури пропалювання переходять до дистанційного визначення місць пошкодження. Серед високочастотних технологій виключно застосовують імпульсні методи, принцип дії яких ґрунтується на вимірюванні часу проходження електромагнітних хвиль ділянками кабельної мережі.

Найпоширенішим серед них є локаційний метод. Його суть полягає у подачі зондувального електричного імпульсу в пошкоджену лінію та фіксації часового інтервалу між моментом відправлення сигналу та отриманням відбитого імпульсу. Якщо швидкість поширення сигналу в лінії позначити як V , а час проходження імпульсу до місця дефекту і назад — як t_x , то відстань до точки відбивання l_x розраховують за формулою $l_x = V \cdot t_x / 2$.

Точність таких вимірювань значною мірою залежить від швидкості поширення імпульсу в конкретному кабелі. Кожна лінія має власне значення швидкості V , яке можна наближено обчислити за відповідною формулою.

$$V = V_c / \sqrt{\varepsilon}, \quad (1.1)$$

де V_c — швидкість поширення світла; ε — відносна діелектрична проникність ізоляції кабелю.

Для деяких типів кабелю значення V (м/с), отримуються експериментально, а похибку характеризують за допомогою коефіцієнта

укорочення електромагнітної хвилі $\gamma = V/V$. Його значення знаходиться в межах $\gamma = 1.1 - 2.0$.

Кабельна лінія має неоднорідності хвильового опору, які прийнято характеризувати коефіцієнтом відображення ρ . Його значення визначають як відношення амплітуд відбитого $U_{\text{відб}}$ і зондуючого імпульсів U_3 . [7,8] Наприклад, при відправленні імпульсу за схемою вимірювання жила-жила його можна визначити з виразу:

$$\rho = \frac{U_{\text{от}}}{U_3} = \frac{z_{M.O} + z_B}{z_{M.O} - z_B}, \quad (1.2)$$

де $z_{M.O}$ - хвильовий опір у місці відбивання; z_B - хвильовий опір кабельної лінії;

$z_B = \sqrt{L_{yd}/C_{yd}}$; L_{yd} , C_{yd} — індуктивність і ємність 1 км кабелю.

Дистанційні ВМП локаційним методом реалізують за допомогою спеціальних вимірювачів ІКЛ на відключеній по обидва боки кабельній лінії. Основним елементом ІКЛ є електронно-променева трубка (ЕЛТ). На екрані ЕЛТ після подачі живлення з'являються дві лінії розгортки. На нижній лінії накладені масштабні поділки часу, на верхній — імпульс, що посиляється у кабельну лінію. Потім ці промені потрібно сфокусувати і сумістити їхній початок з лівим краєм екрану.

Час між моментом подачі імпульсу і приходом відбитого імпульсу t_x (мкс) визначається по формулі:

$$t_3 = na, \quad (1.4)$$

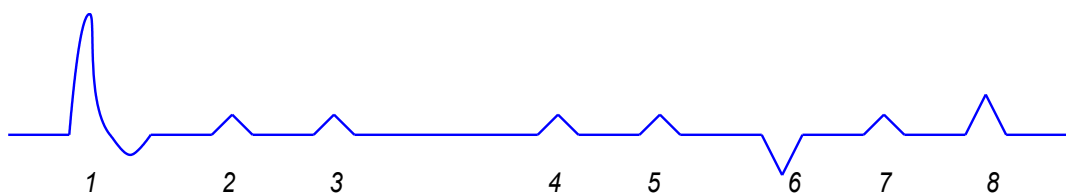
де n - кількість масштабних поділок; a - ціна масштабної поділки, мкс. Приклад зображення відбитих імпульсів на екрані ЕЛТ показаний на рис. 1.1.

Серед низькочастотних способів локалізації пошкоджень кабельних ліній найчастіше використовують петлевий та ємнісний методи. Робота петлевого методу ґрунтується на вимірюванні опору ділянок жил постійному струму. Цей підхід ефективний за умови, що пошкоджена жила має замикання на оболонку без розриву, а в кабелі присутня хоча б одна ціла, непошкоджена жила.

Для визначення відстані до місця аварії застосовують вимірювальний міст постійного струму. Принципова схема такого вимірювання зображена на рисунку 1.2.

Вимірювальне коло складається з чотирьох резисторів R1-R4, що утворюють замкнутий контур. В одну діагональ включено гальванометр G, а в іншу — джерело живлення з електрорушійною силою E. Стан рівноваги моста фіксується, коли стрілка гальванометра залишається на нульовій позначці. У такому випадку виконується співвідношення $R1/R4 = R2/R3$.

Процедура вимірювання передбачає встановлення перемички між пошкодженою та цілою жилами на дальньому кінці лінії, тоді як вимірювальний міст підключають до цих же жил з протилежного боку. У цій схемі R1 та R3 є регульованими опорами приладу, а R2 і R4 відповідають опорам жил кабелю. Сумарний опір утвореної петлі ($R2+R4$) завжди дорівнює подвоєному опору однієї жили R, тобто $R2+R4=2R$. Враховуючи лінійну залежність опору від довжини провідника, після збалансування моста та фіксації значень R1 і R3, шукану відстань l_x розраховують за формулою: $l_x = 2L \cdot R3 / (R1 + R3)$.



- 1 - зондуєчий імпульс;
- 2 - імпульс, відбитий від сполучної муфти;
- 3 - імпульс, що відбивається від місця переходу на кабелі з іншим хвильовим опором;
- 4 - імпульс, відбитий від відгалуженої муфти з навантаженням;
- 5 - те ж, що і 4, але з відключеним навантаженням;

6 - КЗ на оболонку;

7 - наявність вологи у кабелі; 8 - розімкнутий кінець чи обрив жили.

Рисунок 1.1 - Зображення імпульсів на екрані ЕЛТ при локаційному методі досліджень

У випадках обриву жил підземних силових кабелів іноді застосовують ємнісний метод пошуку пошкоджень. Визначення відстані до місця дефекту ґрунтується на вимірюванні ємності жил пошкодженої ділянки. Для цього використовують мости змінного струму з робочою частотою 1 кГц, а функцію нуль-індикатора виконує телефон. Цей метод є ефективним лише за умови, що опір у місці розриву становить не менше десятків Ом.

1.3 Топографічні методи виявлення пошкоджень у наземних та підземних кабельних мережах

Топографічні методи класифікують на дві групи залежно від способу вимірювання реакції на тестовий сигнал: індукційні та контактні.

Індукційні методи базуються на реєстрації параметрів магнітного поля над кабельною лінією, по якій пропускають струм від високочастотного генератора в діапазоні 0,8—12 кГц. Цей підхід застосовують у ситуаціях, коли в місці пошкодження вдається створити електричний контакт між двома жилами з низьким перехідним опором (близько 10 Ом). За допомогою індукційного методу можна не лише локалізувати місце аварії, але й ідентифікувати шуканий кабель у пучку, відстежити трасу пролягання, знайти розташування з'єднувальних муфт та визначити глибину залягання лінії.

Для пошуку міжфазних замикань використовують схему (рисунок 1.3), де генератор звукової частоти UF підключають до двох пошкоджених жил. Оператор рухається вздовж траси з переносним кабелешукачем, до складу якого входять перетворювач сигналу П, підсилювач У та телефон (наушники) ВФ. Прилад реагує на електрорушійну силу, наведену в перетворювачі, яку після підсилення чутно в телефоні. За характером звуку оператор визначає місце розташування кабелю та пошкодження.

Оскільки кабель 1 може пролягати у складних умовах (наприклад, під трубою 2 або всередині труби 4) та мати муфти 3, величина ЕРС у перетворювачі під час руху трасою періодично змінюється від мінімальних до максимальних значень. Крім того, жили кабелю скручені з кроком від 0,5 до 3 м (залежно від перерізу), що також впливає на циклічну зміну напруженості магнітного поля на поверхні ґрунту.

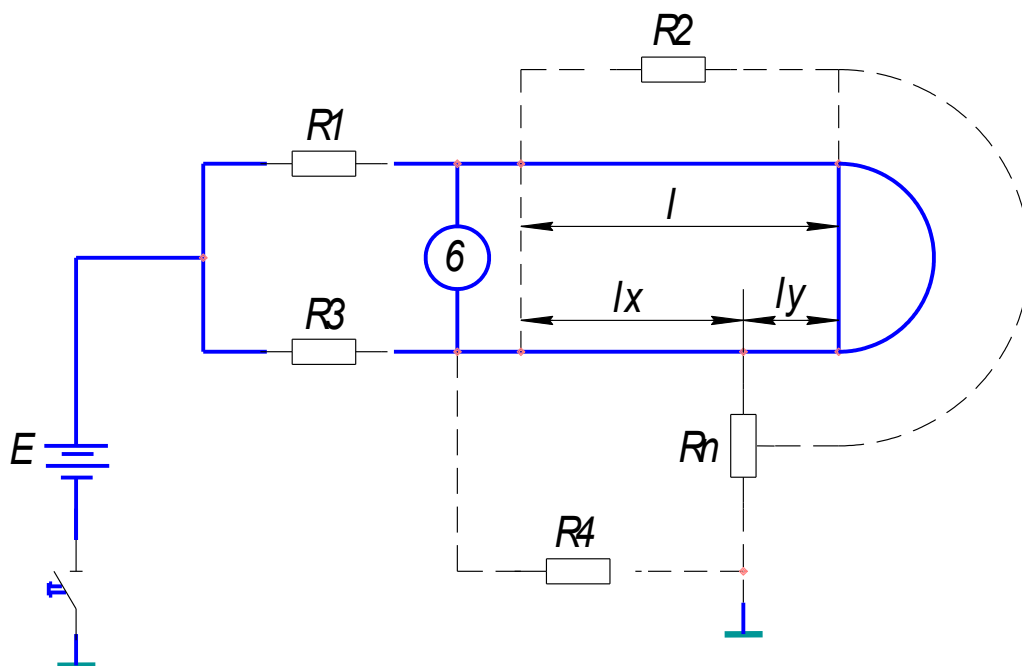


Рисунок 1.2 - Принципова схема визначення місця пошкодження силової кабельної лінії петлевым методом

На окремих ділянках траси (див. рисунок 1.3, б) сигнал у навушниках може різко слабшати. Це, зазвичай, зумовлено значною глибиною залягання кабелю або екрануючим ефектом металевих труб. Натомість над з'єднувальними муфтами звук стає значно гучнішим. У зоні пошкодження сигнал спочатку трохи посилюється, а на відстані 0,5 м за дефектом повністю зникає.

Тому ключовим фактором під час пошуку є динаміка зміни рівня сигналу. Якщо звук зникає плавно, без попереднього сплеску, це свідчить про заглиблення кабелю або його проходження крізь трубу. Якщо ж відбувається посилення сигналу, після якого зникає чутність кроку скрутки, то перетворювач знаходиться безпосередньо над місцем аварії. Для підтвердження результату рекомендується проводити вимірювання з обох кінців лінії — точка зникнення звуку має збігатися.

Точність локалізації міжфазних замикань індукційним методом з

поверхні ґрунту становить $\sqrt{\rho_m}$ 0,5 м, а при доступі до відкритого кабелю — кілька сантиметрів [12]. Також метод ефективний при замиканні двох жил на оболонку в одній точці: у цьому випадку зберігається циклічність сигналу від скрутки, яка різко змінюється над місцем дефекту.

Основні труднощі при визначенні місць пошкодження (ВМП) пов'язані з великою глибиною закладання та наявністю сусідніх кабельних ліній, які створюють перешкоди. У таких ситуаціях рівень корисного сигналу може бути співмірним із рівнем завад.

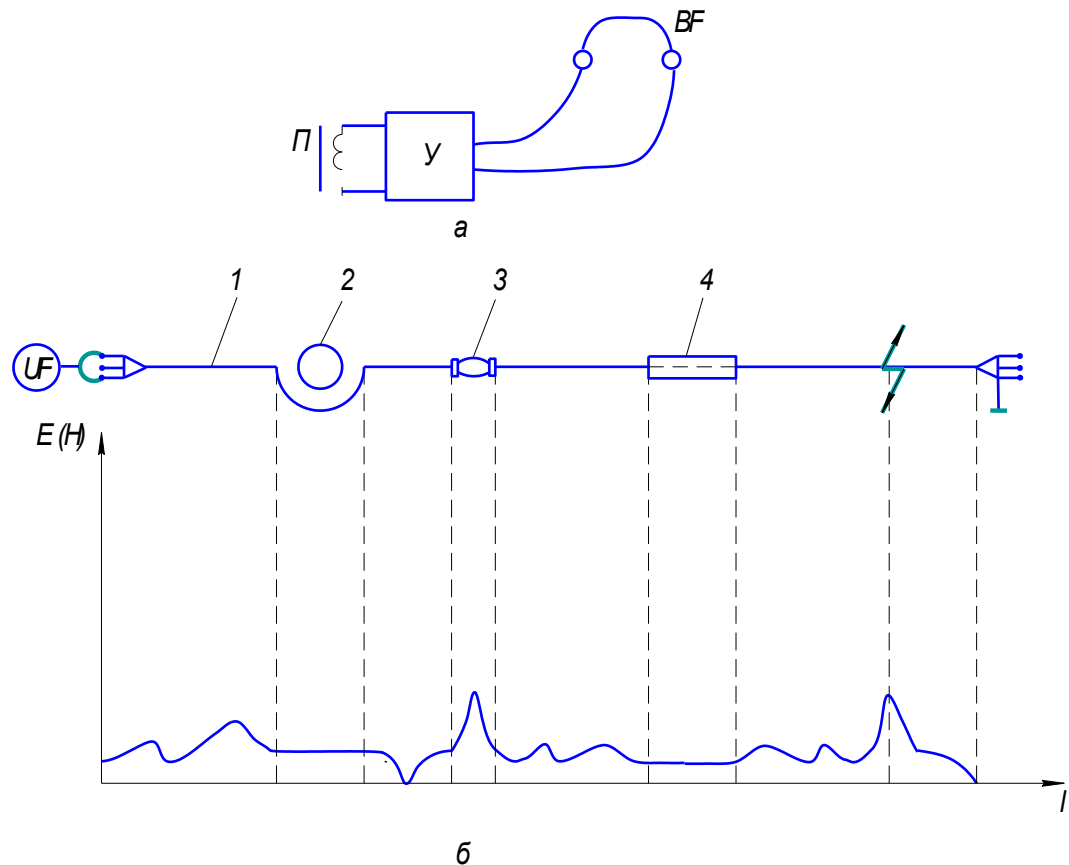


Рисунок 1.3 - Виявлення пошкодження кабелю при міжфазному короткому замиканні індикаторним методом.

a- схема включення генератора звукової частоти;

б- крива вимірювання рівня напруженості магнітного поля

При визначенні місця однофазного пошкодження (замикання жили на оболонку) виникають додаткові труднощі через завади, спричинені струмами розтікання в землі. У таких умовах струм звукової частоти повертається до генератора не лише через оболонку кабелю ($I_{\text{об}}$), а й через землю ($I_{\text{з.к}}$).

Струм $I_{\text{з.к}}$ утворює навколо місця аварії електромагнітне поле з напруженістю $H_p = I_{\text{з.к}}/2\pi r h$. Інтенсивність цього поля значно (у 30–100 разів) перевищує напруженість поля пари струмів H_n . Тому головною проблемою під час пошуку однофазних замикань є виділення корисного сигналу на тлі потужних перешкод.

Для зменшення впливу поля одиничного струму застосовують метод компенсації, реалізований за допомогою спеціальної схеми підключення (рис. 1.4). Суть методу полягає у використанні двох джерел живлення. Генератор G' створює поле пари «жила-жила» та поле одиничного струму I'_p . З іншого боку лінії працює генератор G'' , який створює зустрічні потоки — струм в ушкодженій фазі I'' та струм в оболонці I''_p . Оскільки одиничні струми від різних генераторів спрямовані протилежно, вони взаємно віднімаються. Шляхом налаштування генераторів G' і G'' можна досягти їхньої рівності, що забезпечить максимальний рівень корисного сигналу безпосередньо в зоні пошкодження. Цей метод вимагає синхронної роботи оператора на підстанції та персоналу на трасі.

Для діагностики відкритих кабельних ліній, кабелів у шурфах або для ідентифікації конкретного кабелю в пучку використовують метод накладної рамки. Схема підключення зображена на рисунку 1.5, а, при цьому струм в аварійній жилі встановлюють на рівні близько 5 А.

Вимірювання проводять шляхом обертання рамки навколо кабелю. Якщо точка вимірювання знаходиться перед місцем пошкодження (з боку генератора), то за один повний оберт рамки оператор почує два піки та два спади звучання (рис. 1.5, б). Якщо ж вимірювання проводяться поза зоною пошкодження, то струм протікає по оболонці, створюючи рівномірне поле. У цьому випадку звук у навушниках залишатиметься незмінним протягом усього

оберту (рис. 1.5, в). Цей метод працює лише за умови наявності металевого контакту між жилою та оболонкою.

Окрім індукційних, широко застосовуються контактні методи, що використовують живлення постійною напругою. Пошук здійснюється за допомогою двох металевих щупів, підключених до гальванометра, які занурюють у ґрунт на відстані 1–1,5 м один від одного. Наближення до місця пошкодження фіксується за зміною розподілу струмів та відхиленням стрілки приладу. Найвищу точність дає безпосередній контакт щупів із металевою оболонкою кабелю.

До контактних методів також належить акустичний спосіб, який полягає у прослуховуванні з поверхні землі звукових ударів, що виникають внаслідок іскрового розряду в місці дефекту під дією високовольтних імпульсів.

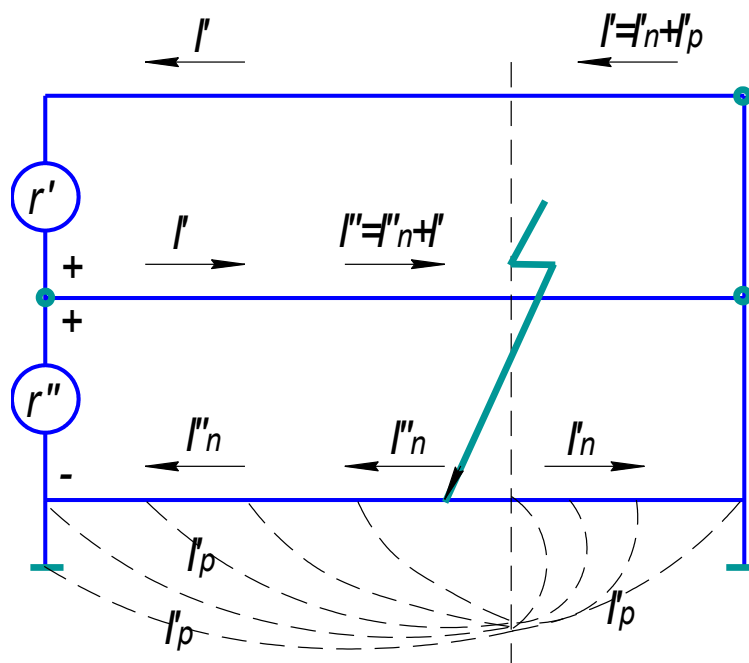


Рисунок 1.4 - Схема компенсації струмів розтікання кабельної лінії

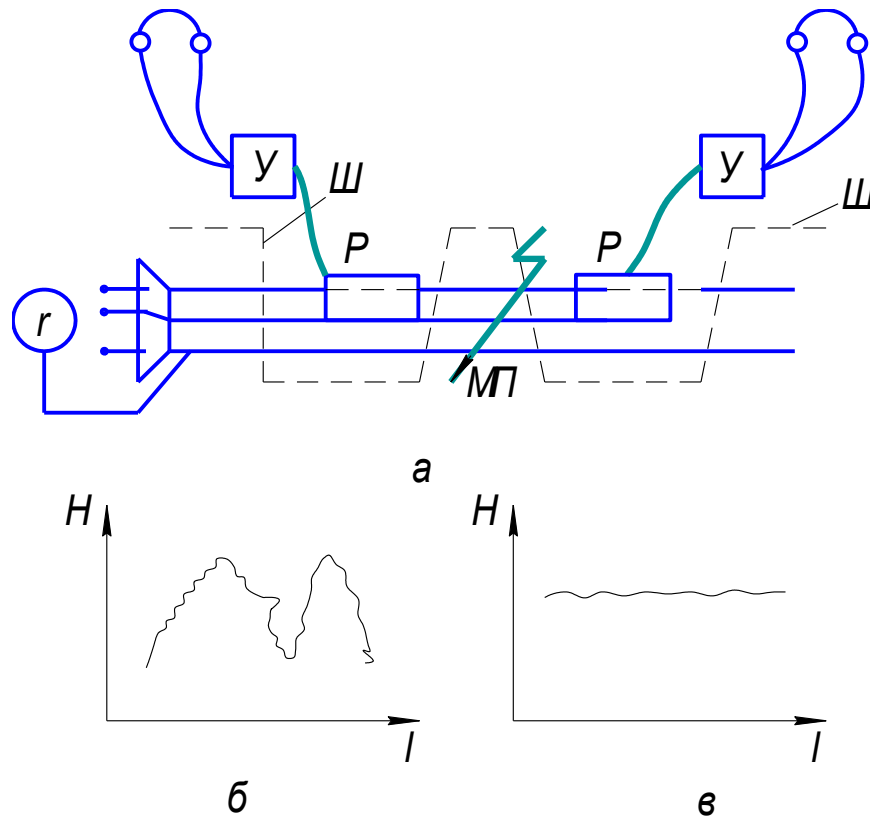


Рисунок 1.5 - Схема підключення (а) і характеристики напруженості магнітного поля до місця ушкодження (б) і після (в): Г - високочастотний генератор; Ш - шурф; Р - рамка; У - підсилювач

Для створення іскрового розряду у місці ушкодження кабелю необхідно, щоб до цього місця було прикладено достатньо високу імпульсну напругу U_i , значення якої знаходиться з виразу:

$$U_i = U_m 2R_n / (2R_n + Z_\phi), \quad (1.5)$$

де U_m — амплітуда імпульсу, що посиляється; R_n - перехідний опір в місці ушкодження; Z_ϕ - хвильовий опір.

З рівності (1.5) видно, що при зниженні перехідного опору до значення хвильового опору кабелю починає різко зменшуватися напруга на іскровому проміжку. Тому при малому значенні перехідного опору іскровий розряд може і не виникнути.

Для того щоб усунути це явище, використовують спеціальні схеми (рисунок 1.6, а-в).

При імпульсному пробі виникає велике падіння напруги на заземленні, що може призвести до зворотного перекриття із заземлення на низьковольтну мережу. Щоб уникнути цього конденсатор і інші елементи ланцюга імпульсного розряду заземляють окремим провідником з виносним заземлювачем. Рівень вихідного сигналу (коли в захисній оболонці кабелю є отвір) буде тим вищий, чим більша густина і однорідність ґрунту, розташованого над кабелем.

Найбільшу зону чутливості забезпечують глинисті ґрунти, лід, монолітні бетонні покриття.

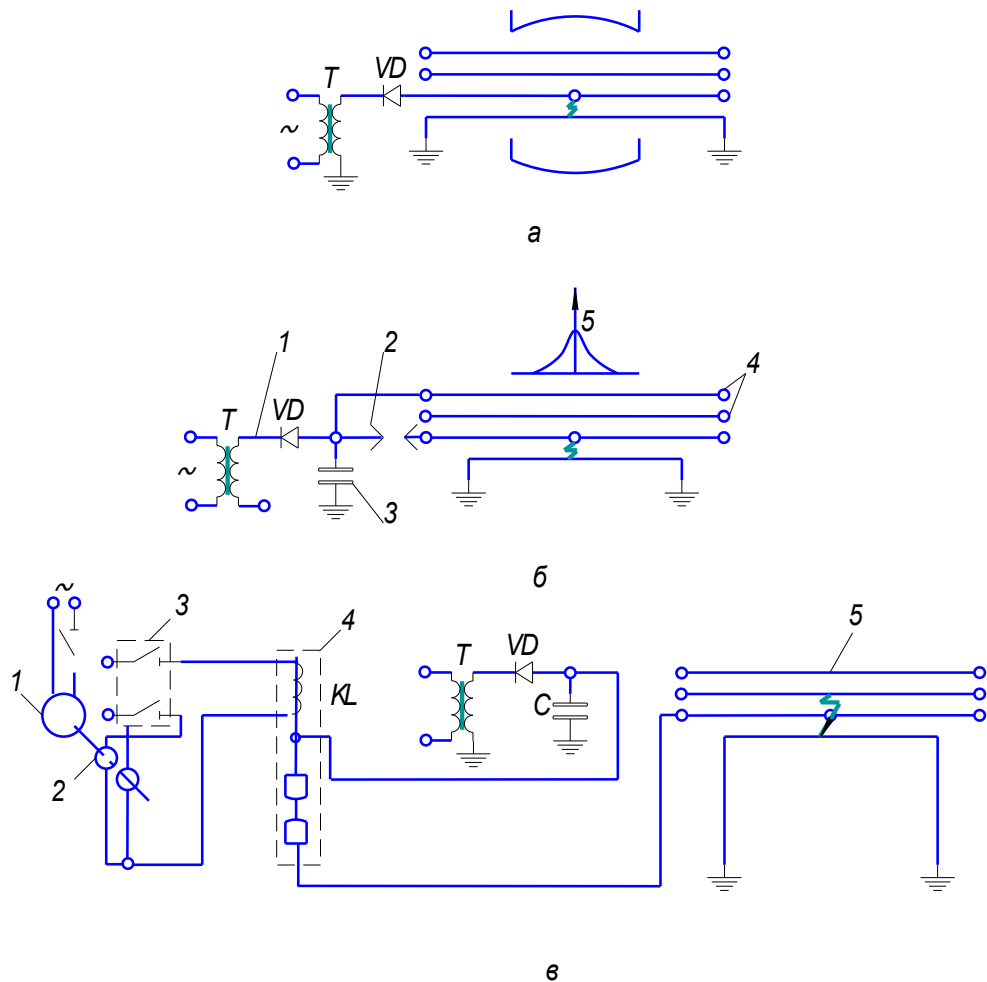
Важливим показником ефективності акустичного методу є енергія розряду (Дж), що розраховується з формули:

$$W = CU_m^2 / 2, \quad (1.6)$$

де C - ємність, що розряджається на ушкоджений кабель, мкФ.

Оскільки, як $W = U_m^2 C$, то варто прагнути до максимального підйому напруги U_i , обмежуючи його рівнем допустимих перенапруг. Для низьковольтних кабелів енергію збільшують, в основному, за рахунок ємності, використовуючи батареї в десятки і навіть сотні мікрофарад [11].

Для акустичного методу досить, щоб $W = 200 \dots 1000$ Дж. Ця енергія забезпечується для кабельних ліній 6-10 кВ при $U_m = 20$ кВ і $C = 0,5 \dots 2,5$ мкФ.



а, б - кабелі, що знаходяться під напругою вище 1000 В
 1 - випростувач; 2 - розрядник; 3 - конденсатор; 4 - неушкоджені жили кабелю; 5 - характеристика вихідного сигналу над місцем ушкодження;
 в - кабелі під напругою до 1000 В 1 - двигун Уорена; 2 - комутатор;
 3 - перемикач; 4 - розрядник; 5 - жили кабеля; T - трансформатор;
 VD - випростувач; KL - обмотка проміжного реле; е - електроди

Рисунок 1.6 - Принципова схема виявлення пошкодження акустичним методом

Пошук місця пошкодження акустичним методом починають після виділення зони пошуку розглянутими вище дистанційними методами. Періодичність іскрових розрядів у кабелі встановлюють рівною одному пробою

в 2—6 с.

Пошуки у зоні ушкодження здійснюються шляхом установки акустичного датчика на ґрунт чи дорожнє покриття над трасою кабелю через кожні 1—2 м до досягнення максимальної чутливості іскрових розрядів. Якщо траса кабелю точно не відома, то її уточнюють за допомогою індукційної рамки, у якій наводиться імпульсна напруга в момент розряду.

У процесі пошуку періодичність розрядів може порушуватися через обгорання електродів розрядника, тому часто застосовують трьохелектродні розрядники.

1.4 Постановка задачі на дипломне проектування

Проведений порівняльний аналіз підтверджує доцільність створення пристрою для виявлення дефектів у наземних і підземних кабельних мережах, що перебувають під напругою, з використанням сучасних методів діагностики. У рамках цього дипломного проекту планується вирішення низки завдань, які дозволять здійснювати оперативний пошук кабелів, локалізацію пошкоджень та ідентифікацію ліній у режимі реального часу. Основні етапи роботи включають:

Обґрунтування вибору оптимального методу діагностики силових ліній та визначення принципу роботи пристрою на базі аналізу існуючих технологій.

Проектування структурної схеми приладу для дефектоскопії кабельних мереж різного типу залягання.

Розробку принципової електричної схеми та розрахунок параметрів компонентів електронного фільтра.

Конструювання корпусу пристрою.

Проектування друкованої плати та створення складального креслення для імпульсного блока живлення.

Розробку методики пошуку пошкоджень у наземних та підземних мережах із використанням спроектованого приладу.

Виконання метрологічного аналізу розробленого обладнання.

Проведення техніко-економічного обґрунтування доцільності розробки та оцінку очікуваного економічного ефекту від впровадження.

Розробку заходів з охорони праці та виробничої санітарії.

2 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ВИМІРЮВАНЬ ТА КОНСТРУКЦІ ІВС ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У НАЗЕМНИХ ТА ПІДЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖАХ

Прилад для пошуку пошкоджень у підземних кабельних мережах може бути використаний як для безпосереднього пошуку місць пошкоджень, так і у процесі проведення випробувань на міцність ізоляції кабельних ліній під час їх будівництва та експлуатації.

2.1 Теоретичні основи створення ІВС для пошуку пошкоджень у кабельних мережах

Головною перевагою дистанційних приладів, що працюють за локаційним принципом, є можливість виконання вимірювань, підключившись лише до одного кінця лінії. Це дозволяє з високою точністю визначити відстань до місця пошкодження, базуючись на часі проходження електричного імпульсу.

Однак, вказати точну географічну точку аварії виключно за даними локаційних приладів можливо лише за наявності доступу до кабелю (наприклад, у коробах або тунелях метро) та точної розмітки траси. Додатковими орієнтирами слугують видимі ознаки: обриви, деформація броні, сліди кіптяви, пробою або зволоження ізоляції.

Прилади трасового пошуку дають змогу не лише знайти маршрут пролягання кабелю та глибину його закладання, але й точно локалізувати місце дефекту.

Суттєвим недоліком трасових методів є необхідність обстеження всієї довжини лінії, якщо зона пошкодження заздалегідь невідома. Це призводить до значних витрат часу та коштів, знижуючи ефективність робіт, особливо на

довгих магістралях або у важкодоступних місцях. Щоб уникнути цього, доцільно комбінувати методи для попереднього звуження зони пошуку.

Серед методів трасової діагностики найбільш поширеним є індукційний метод.

Його принцип базується на фіксації магнітного поля, яке створюється струмом, що протікає по кабелю. Силові лінії цього поля мають вигляд концентричних кіл навколо провідника (рисунок 2.1). Виявлення поля дозволяє знайти кабельну трасу, а вимірювання його характеристик — визначити глибину залягання та точку пошкодження. Як чутливий елемент зазвичай використовують пошукову котушку з осердям, що концентрує магнітне поле.

Якщо розташувати вісь котушки горизонтально (паралельно землі), то безпосередньо над кабелем індукуватиметься сигнал максимальної амплітуди (рисунок 2.1, а). При зміщенні вбік сигнал плавно слабшає. Метод «максимуму» використовують для орієнтовного визначення траси, оскільки через плавність зміни рівня сигналу досягти високої точності складно.

Для точнішої локалізації вісь котушки орієнтують перпендикулярно до землі (вертикально). У такому положенні безпосередньо над віссю кабелю сигнал має мінімальну амплітуду (рисунок 2.1, б). При найменшому відхиленні вбік спостерігається різке зростання сигналу, який потім плавно спадає. Цей метод «мінімуму» дозволяє значно точніше визначити положення кабелю.

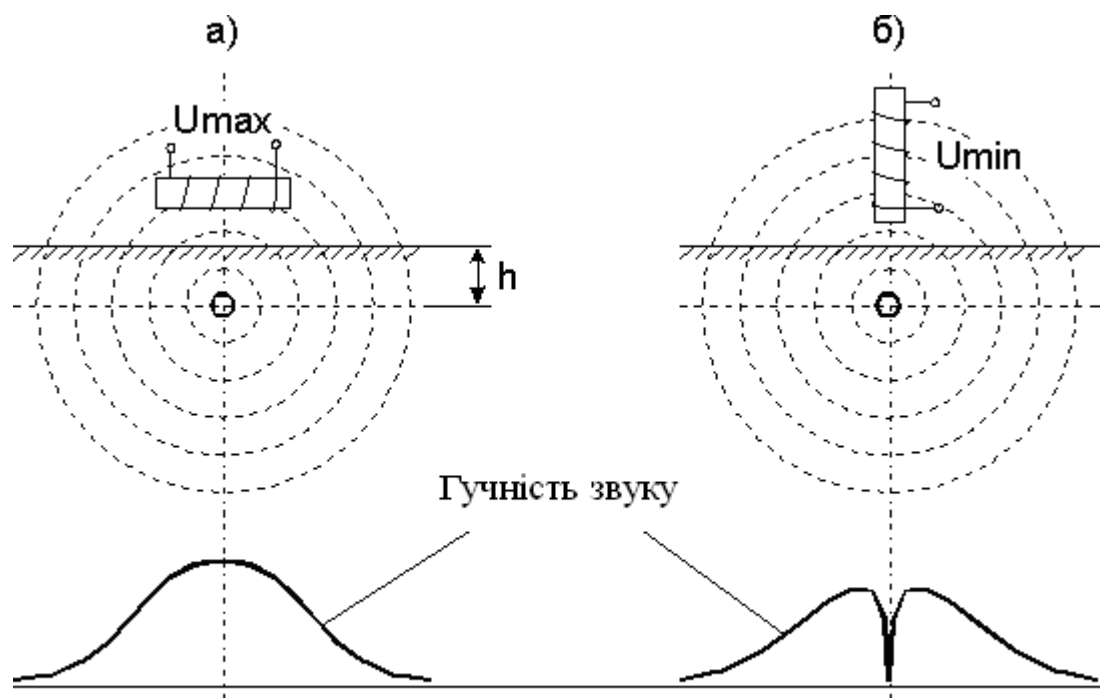


Рисунок 2.1 – Індукційний метод пошуку кабельних ліній

а – розміщення котушки паралельно осі кабельної лінії;

б - розміщення котушки перпендикулярно осі кабельної лінії

Вертикальна орієнтація котушки відносно поверхні ґрунту забезпечує отримання чіткого мінімуму сигналу, що на практиці є ключовим фактором для високоточного визначення розташування кабелю.

Для ефективного трасування ліній та локалізації місць пошкоджень зазвичай застосовують спеціалізовані індукційні системи. До складу таких комплектів входять генератор звукової частоти та індукційний приймач. Як приклад подібного обладнання можна навести моделі виробництва фірм СТЕЛЛ (SG-600, SG-80), SAMSUNG (PM-8800) та RFT (SBF-1A).

2.2 Визначення траси залягання підземної та наземної кабельної мережі

Перед початком робіт із визначення траси силової лінії необхідно виконати попереднє обстеження місцевості за допомогою індукційних

приладів. Ця процедура є обов'язковою перед стартом будь-яких земляних робіт для запобігання пошкодженню комунікацій, а також під час пошуку маршруту кабелю для проведення ремонту.

У випадках, коли неможливо вивести лінію з експлуатації або підключити до неї генератор звукової частоти, обстеження виконують лише за допомогою приймача. У такому режимі пошук базується на фіксації електромагнітного поля промислової частоти 50 Гц.

Однак найбільш ефективним способом, особливо в умовах щільної прокладки інших комунікацій, є використання повного індукційного комплексу. Для цього генератор звукових частот підключають до початку або кінця шуканої лінії.

Схему загального обстеження території зображено на рисунку 2.2.

Працюючи на незнайомій ділянці, оператори обходять її по периметру, прослуховуючи сигнали приймача. При цьому вісь пошукової котушки має розташовуватися горизонтально, паралельно напрямку руху. Будь-яка лінія, що перетинає цю територію, буде зафіксована двічі під час обходу контуру.

У момент перетину кабельної траси прилад видає відповідний сигнал. Точка, де амплітуда цього сигналу досягає максимуму, відповідає місцю розташування кабелю. Для підвищення надійності результатів рекомендується обійти периметр кілька разів. Якщо досліджувана площа є значною, її слід розділити на окремі сектори для поетапного обстеження.

Після завершення загального огляду та виявлення ключових точок переходять до безпосереднього трасування лінії. Рухаючись між знайденими позначками, оператор за допомогою індукційного приймача уточнює

конкретний маршрут пролягання кабелю, як показано на рисунку 2.3.

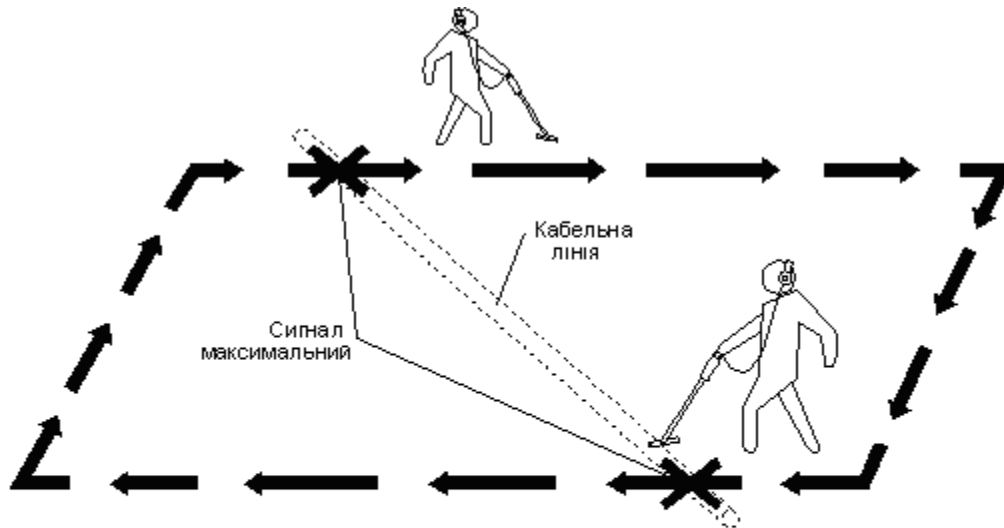


Рисунок 2.2 – Широке обслідування місцевості по периметру

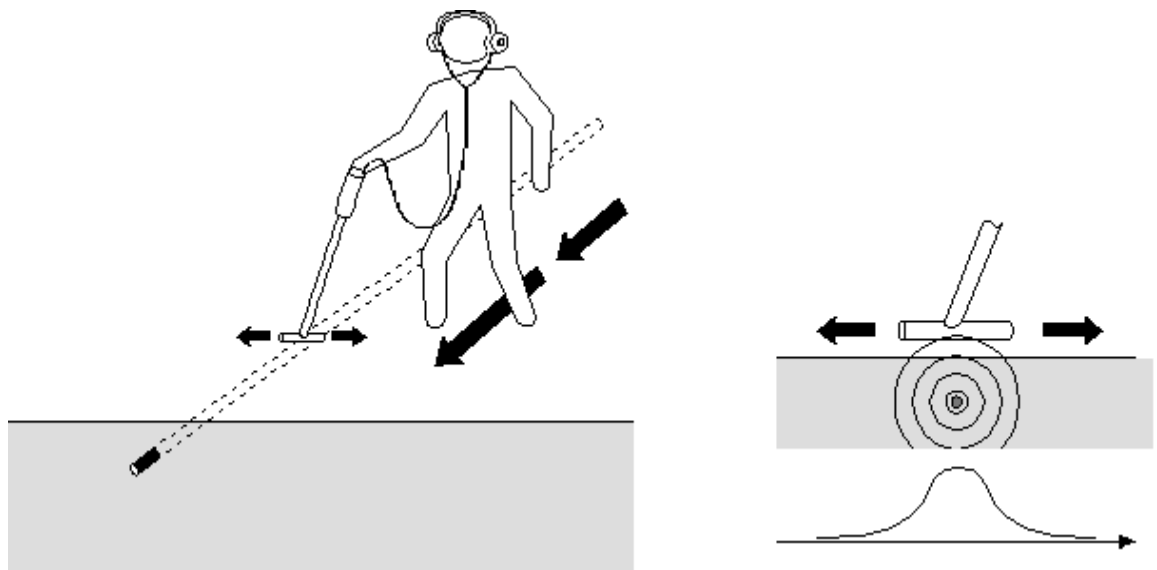


Рисунок 2.3 – Визначення траси кабельної лінії

Точне визначення траси кабельної мережі здійснюється по максимальному рівню сигналу, прийнятого індукційним приймачем. Для цього вісь котушки повинна знаходитися паралельно поверхні землі і перпендикулярно осі кабельної лінії.

2.3 Розробка методики під'єднання генератора до досліджуваної кабельної мережі

Для того, щоб прилад функціонував нормально, а похибка вимірювань була зведена до мінімуму необхідно правильно підключити генератор до кабельної лінії. Безпосереднє підключення генератора до кабельної лінії використовується у всіх випадках, коли це можливо. При безпосередньому зв'язку вихідний струм генератора протікає безпосередньо по кабелю, тому створюване ним поле має найбільшу ефективність. Це дозволяє досягти найвищої ефективності пошуку індукційним методом: найбільшої дальності і глибини виявлення кабельної лінії [14 – 16].

2.3.1 Безпосереднє підключення генератора по схемі "непошкоджена жила - земля"

Для реалізації цього методу один вихідний контакт імпульсного генератора підключають до цілої жили кабелю, а інший — до заземлення. У ролі заземлювача можна використовувати спеціальний металевий штир довжиною 0,5 м, заглиблений у ґрунт на відстані 6–8 м, або ж скористатися водопровідними трубами чи опорами ліній електропередач. Протилежний кінець обраної жили також необхідно заземлити. Схема такої комутації, відома як «непошкоджена жила — земля», зображена на рисунку 1 аркуша ДП.ВТз – 15.00.00.001.

У цьому колі струм від генератора проходить переважно через жилу кабелю і повертається через землю. Це створює навколо провідника електромагнітне поле, інтенсивність якого залишається відносно стабільною на всій протяжності лінії, що дозволяє ефективно відстежувати трасу.

Втім, певна частина зворотного струму може проходити не через ґрунт, а по металевій броні або екрану кабелю. Це явище спричиняє загальне зниження рівня сигналу, а також його поступове згасання по мірі віддалення від джерела.

Ослаблення поля пояснюється двома факторами. По-перше, струми в жилі та оболонці рухаються у зустрічних напрямках, що призводить до часткової взаємної компенсації їхніх магнітних полів. По-друге, впливає ємнісна складова струму, величина якої зменшується зі збільшенням відстані від початку лінії. Графік розподілу інтенсивності поля для цієї схеми наведено на рисунку 2 відповідного аркуша.

2.3.2 Безпосереднє підключення генератора по схемі "непошкоджена жила - броня"

За такої схеми один вихід генератора під'єднують до цілої жили, а інший — до броні або екрану кабелю. На протилежному кінці траси ці ж елементи (жилу та броню) також з'єднують між собою. Графічне зображення такого варіанта комутації, відомого як «непошкоджена жила — броня», наведено на рисунку 3 аркуша ДП.ВТз – 15.00.00.001.

У цьому випадку струм проходить через жилу і повертається по захисній оболонці. Оскільки потоки рухаються у зустрічних напрямках, їхні магнітні поля частково компенсують одне одного, що призводить до зменшення сумарної інтенсивності поля навколо лінії.

Якщо ж генератор підключити до двох жил, які закорочені на дальньому кінці, то магнітне поле навколо кабелю матиме характерну періодичну змінюваність.

Методи прямого підключення через неушкоджені жили та броню є зручними для загального пошуку траси на місцевості. Однак їхнім спільним недоліком є необхідність доступу до протилежного кінця лінії для створення перемички.

У ситуаціях із повним обривом кабелю або стійким коротким замиканням (міжфазним чи на корпус) маніпуляції на віддаленому кінці стають безглуздими або неможливими, оскільки цілісність кола вже порушена в невідомому місці. Тому в аварійних випадках застосовують специфічні схеми підключення, які дозволяють одночасно відстежувати трасу та шукати точку пошкодження. Далі розглянуто приклади таких з'єднань.

2.3.3 Безпосереднє підключення генератора по схемі "обривана жила - броня"

Цей спосіб підключення є модифікацією методу «непошкоджена жила — броня», проте має суттєву відмінність: на віддаленому кінці лінії з'єднання між жилою та захисною оболонкою відсутнє

Робота цього методу базується на використанні розподіленої електричної ємності кабелю. Струм від генератора проходить по пошкодженій жилі, а коло замикається через ємність ізоляції на броню. По мірі віддалення від джерела живлення величина струму в жилі поступово зменшується через його стікання через розподілену ємність. Як наслідок, інтенсивність електромагнітного поля навколо кабелю також спадає, досягаючи нульового значення безпосередньо в місці обриву. Графік затухання поля вздовж лінії представлено на рисунку 2 відповідного аркуша.

Для отримання сильнішого сигналу над трасою необхідно збільшити силу струму в кабелі. У цьому випадку струм проходить через розподілений ємнісний опір між жилою та бронєю, погонне значення якого визначається за наведеною формулою:

$$X_i = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C_i} \quad (2.1)$$

де: X_i - опір ємності i -тої ділянки кабелю,

$\omega = 2\pi f$ - кругова частота (f -вихідна частота генератора),

C_i - ємність і-тої ділянки кабелю.

Для збільшення струму необхідно зменшити опір ємності, для чого згідно виразу формули (2.1) необхідно або вибрати вищу вихідну частоту генератора, або збільшити погонну ємність кабелю.

Збільшення погонної ємності кабелю можна добитися паралельним з'єднанням декількох жил кабелю.

2.3.4 Безпосереднє підключення генератора між двома короткозамкнутими жилами кабельної лінії

При використанні цього методу генератор підключають до двох жил кабелю, які замкнені між собою. Струм у такому колі циркулює по петлі: по одній жилі він рухається в прямому напрямку, а по іншій повертається назад.

Цей спосіб найкраще підходить для виявлення так званих «металевих» коротких замикань, де перехідний опір є низьким (близько 1 Ом). Важливою умовою є відсутність контакту між пошкодженими жилами та захисною оболонкою або екраном. Якщо такий контакт наявний, його попередньо руйнують за допомогою високовольтних імпульсів.

Пошук місця пошкодження проводять у режимі безперервної генерації сигналу. Оператор рухається вздовж траси, тримаючи пошукову котушку приймача горизонтально (паралельно землі) та перпендикулярно до напрямку руху.

Характерною ознакою справної лінії є періодична зміна гучності сигналу (посилення та послаблення). Це явище зумовлене спіральною скруткою жил у кабелі. Через це на поверхні землі по чергово домінує магнітне поле то прямого, то зворотного провідника. Важливо зазначити, що при зміні орієнтації котушки з горизонтальної на вертикальну максимуми та мінімуми гучності будуть чергуватися у протифазі.

Окрім скрутки, на інтенсивність поля впливають особливості прокладання лінії. Наприклад, над з'єднувальними муфтами сигнал стає гучнішим, оскільки там жили розходяться на більшу відстань і відсутня скрутка, що зменшує взаємну компенсацію полів. Натомість, якщо кабель заглиблюється в землю, сигнал плавно слабшає. Різке падіння інтенсивності спостерігається на ділянках, де лінія проходить крізь металеві труби, які екранують електромагнітне випромінювання.

Безпосередньо над місцем короткого замикання відбувається зміна структури магнітного поля та порушення компенсації потоків, що призводить до помітного сплеску інтенсивності сигналу. Одразу за точкою пошкодження звук у приймачі зникає повністю, оскільки струм далі не протікає.

2.3.5 Індуктивний зв'язок генератора з кабельною лінією

Індуктивний метод зв'язку застосовують для безконтактного обстеження території на наявність підземних кабелів або металевих трубопроводів. Цей спосіб є незамінним перед початком земляних робіт або у випадках, коли пряме підключення до комунікацій неможливе. Для реалізації методу використовують спеціальну індукційну рамку, під'єднану до генератора, який розміщують на поверхні землі над імовірним місцем пролягання мереж.

Принцип дії полягає в тому, що струм у витках рамки створює первинне магнітне поле. Воно проникає крізь ґрунт і охоплює підземний провідник (кабель чи трубу), індукуючи в ньому електричний струм. Цей наведений струм, у свою чергу, створює власне вторинне магнітне поле навколо комунікації, яке реєструється індукційним приймачем. Це дозволяє виявити об'єкт без фізичного контакту з ним. Метод є ефективним також для пошуку ізольованих від землі трубопроводів.

Ефективність передачі сигналу залежить від взаємного розташування приладів. Максимальний зв'язок досягається, коли площина рамки генератора знаходиться безпосередньо над лінією та орієнтована паралельно до неї.

Рекомендована методика пошуку включає наступні кроки:

Індукційний приймач встановлюють у центрі зони, яку необхідно обстежити.

До генератора з автономним живленням підключають індукційну рамку.

Щоб уникнути прямих наведень від генератора на приймач, пристрій відносять на відстань не менше 15 метрів. Рамку генератора встановлюють перпендикулярно до землі, орієнтуючи її площину в бік приймача.

Увімкнувши генератор, оператор починає рухатися по колу навколо приймача. При цьому важливо зберігати вертикальне положення рамки та її спрямованість на центр кола.

Коли генератор перетинає підземну комунікацію, приймач фіксує сигнал максимальної потужності. Це місце слід позначити й продовжити рух до завершення повного кола. Зазвичай фіксується ще одна точка перетину з трасою, яку також маркують.

Для надійності процедуру обходу повторюють, перевіряючи знайдені точки.

На завершальному етапі генератор встановлюють безпосередньо над виявленою лінією. Це дозволяє оператору з приймачем пройти маршрутом від однієї позначки до іншої та точно визначити траєкторію пролягання кабелю чи трубопроводу.

2.3.6 Визначення траси працюючої кабельної лінії без генератора

Довкола діючих силових кабелів, ліній зв'язку та металевих трубопроводів завжди існують магнітні поля. Їхніми джерелами є робочі струми в жилах, зрівняльні струми в захисних екранах і броні, а також

різноманітні блукаючі та наведені струми. Частотний діапазон таких полів зазвичай починається від 50 Гц. Окремим випадком є нафтопроводи, де фіксується частота 100 Гц, викликана роботою систем катодного захисту.

Завдяки цьому явищу пошук підземних комунікацій можна проводити в пасивному режимі, використовуючи лише індукційний приймач без підключення зовнішнього генератора.

Методика такого пошуку полягає у скануванні місцевості приймачем, здатним фіксувати звукові частоти від 50 Гц. При цьому пошукову котушку слід утримувати горизонтально, максимально наближаючи її до поверхні землі.

У момент перетину кабельної траси або трубопроводу прилад реєструє звуковий сигнал, гучність якого стає максимальною безпосередньо над об'єктом. Цей принцип дозволяє доволі точно встановити маршрут пролягання мереж.

Варто зазначити, що кожна лінія має свою унікальну тональність звучання. Досвідчений оператор, який володіє відповідними навичками, здатен на слух розрізнити ці відтінки, що дозволяє ідентифікувати та розділяти навіть ті комунікації, які прокладені поруч одна з одною.

2.3.7 Підключення генератора до працюючої кабельної лінії через фільтр приєднання

Застосування індукційних трасопошукових приладів для визначення точного місцезнаходження траси кабельної лінії можливе не тільки для відключеної кабельної лінії, але і у разі працюючої кабельної лінії, без відключення її від напруги живлення з частотою промислової мережі 50 або 60 Гц. Можливе також визначення траси нафтопроводу, що має катодний захист з

частотою струму 100 Гц. Ці можливості існують завдяки різниці частот працюючої кабельної лінії і робочих частот індукційного трасошукача (як правило 1 кГц і вище).

Для реалізації вказаних можливостей індукційний генератор підключають до працюючої кабельної лінії через спеціальний фільтр приєднання. Схема підключення генератора до кабельної лінії через фільтр приєднання показана на рисунку 2.4.

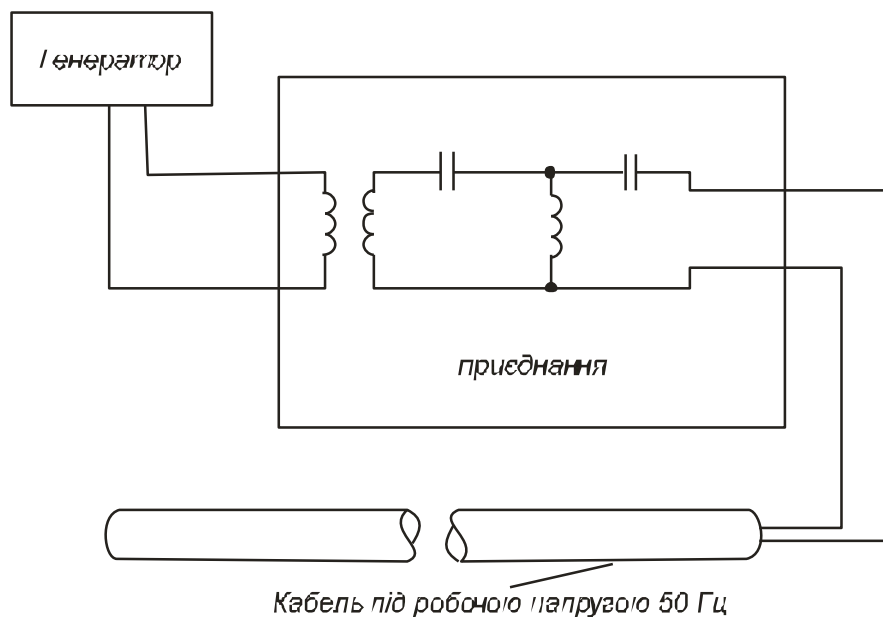


Рисунок 2.4 - Схема підключення генератора до кабельної лінії через фільтр приєднання

Амплітудно-частотна характеристика фільтру приєднання показана на рисунку 2.5. З цього рисунка видно, що фільтр приєднання є фільтром верхніх частот. Він вільно пропускає у кабельну лінію струм від індукційного генератора і запобігає попаданню робочої напруги кабелю на генератор.

Після підключення до працюючої кабельної лінії індукційного генератора у ній протікають одночасно струми двох частот: 50 Гц і робочої частоти генератора, наприклад 1,47 кГц. Приймаючи індукційним приймачем сигнали на частоті 1,47 кГц, є можливість визначити точне місцезнаходження траси

працюючої кабельної лінії, зокрема за наявності інших працюючих кабельних ліній.

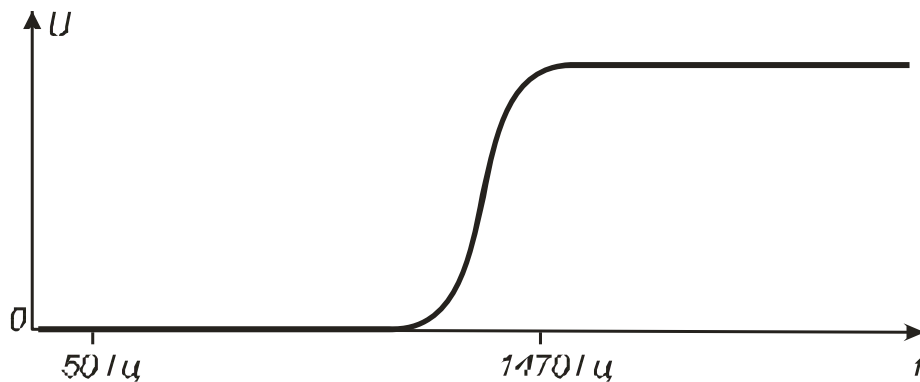


Рисунок 2.5 - Амплітудно-частотна характеристика фільтру приєднання

2.4 Вибір методики визначення глибини залягання підземної кабельної мережі

2.4.1 Методики визначення глибини залягання одиничних підземних кабельних ліній

Локалізація пошкодження неможлива без точного визначення глибини залягання кабелю. Сучасні індукційні трасошукачі дозволяють ефективно вирішувати це завдання.

Вимірювання базується на аналізі концентричного магнітного поля, створюваного кабелем. Якщо вісь приймальної котушки паралельна силовим лініям, наведена ЕРС максимальна (рис. 1, а), якщо перпендикулярна — мінімальна (рис. 1, б). Під час руху нахиленої котушки над поверхнею рівень сигналу змінюється за закономірністю, показаною на рис. 1, в.

Для роботи використовують високочутливі трасошукачі (наприклад, SG-80, SG-600, RFT). Зазвичай приймач таких приладів вбудований у рукоятку

штанги, на кінці якої під кутом 45 градусів закріплена пошукова котушка (рис. 2).

Алгоритм вимірювання глибини:

Підключення генератора: Генератор сигналів (SG-80, TGF-500 тощо) приєднують до лінії прямим або індуктивним способом. Пряме підключення є пріоритетним і має два варіанти:

Для обірваних ліній: одна клема — на замкнені між собою жили, інша — на оболонку/екран.

Для справних жил: одна клема — на жили, заземлені на дальньому кінці, інша — на виносне заземлення (кілька метрів убік).

Пошук траси: Використовуючи стандартні методи, знаходять точне місце пролягання кабелю.

Визначення "нульової" точки: Штангу розташовують вертикально над трасою (котушка перпендикулярна землі). Переміщуючи прилад вправо-вліво, знаходять точку з мінімальним сигналом (точка 1), де зміщення в будь-який бік викликає різке зростання гучності.

Вимірювання глибини (метод 45°): Утримуючи штангу вертикально, орієнтують котушку перпендикулярно до осі кабелю. Рухаючись від точки 1 перпендикулярно трасі в обидва боки, знаходять позиції мінімального сигналу (точки 2 і 3). Згідно з геометричними побудовами (рис. 3), відстань від точки 1 до точок 2 або 3 дорівнює глибині залягання.

Недоліком методу 45° є значне віддалення антени від джерела сигналу під час вимірювання, що знижує точність (похибка 8–10%) і вимагає громіздкої конструкції.

Для оптимізації габаритів і підвищення точності (до 2–5%) пропонується використовувати метод повороту антени на кут 63,4°.

У цьому варіанті (рис. 2) магнітна антена шарнірно закріплена на штанзі. Процедура виглядає так:

Горизонтальною антеною за максимумом сигналу знаходять трасу (антена перпендикулярна кабелю).

Повертають антену в горизонтальній площині на 90° (паралельно кабелю) для уточнення максимуму.

Нахиляють антену на кут $63,4^\circ$ відносно горизонту.

Переміщують прилад вправо та вліво від осі траси до точок мінімуму сигналу (позиції «4б» і «4в»).

Відстань між знайденими точками мінімуму дорівнює глибині залягання кабелю. Перевага цього методу в тому, що антена залишається максимально наближеною до кабелю (відстань зростає лише на 12% проти 41% у методі 45° і понад 2 рази в класичних методах), що забезпечує вищу точність і простішу реалізацію. Саме ця методика обрана за основу для розроблюваного приладу.

2.4.2 Особливості визначення глибини залягання при паралельному проходженні інших кабельних ліній

Розглянута у п.п. 2.4.1 методика визначення глибини залягання кабельної лінії дає правильні результати у тому випадку, коли силові лінії магнітного поля мають форму концентричних кіл. При цьому відстані від точки 1 (під кабелем) до точки 2 і точки 3 з мінімальною гучністю сигналу будуть однакові або близькі по величині.

Проте, силові лінії магнітного поля мають форму концентричних кіл тільки для одиночного провідника із струмом. Це можливо, якщо по жилах (жилі) кабелю струм протікає тільки у одному напрямі, а зворотний струм протікає по іншому шляху, наприклад по землі або по іншому кабелю, віддаленому від вимірюваної кабельної мережі.

Якщо прямий струм від генератора протікає по всіх жилах кабелю, а зворотний струм - по оболонці або екрану, то відбувається деяка взаємна компенсація створюваних цими струмами полів. У цьому випадку результуюче ослаблене магнітне поле також має форму концентричних кіл.

Якщо форма силових ліній магнітного поля спотворена, то точне визначення глибини залягання кабельної лінії описаним вище методом стає значно важчим.

Спотворення силових ліній магнітного поля має місце, коли шлях проходження прямого і зворотного струмів кабелю розміщені достатньо близько один біля одного. Наприклад, якщо прямий струм протікає по одній жилі кабелю, а зворотний - по іншій жилі того ж кабелю.

Аналогічна ситуація виникає у разі, коли прямий струм протікає по одному кабелю, що шукається, а зворотний - по другому, прокладеному близько до першого. Цей випадок показаний на рисунку 3 аркуша ДП.ВТ₃ – 15.00.00.003.

Через спотворення форми магнітного поля точка 1 зміщена щодо місця залягання кабельної лінії, що шукається, точка 2' і точка 3 несиметрично розміщена щодо точки 1, а також мають місце нерівності:

$$L_1' \neq L_2, L_1' \neq h, L_2' \neq h \text{ і } (L_1' + L_2')/2 \neq h$$

Отже, при такому спотворенні магнітного поля вимірювання по описаних раніше методах приведуть до помилок як у визначенні місця, так і глибини залягання кабельної лінії.

Тому, при вимірюванні глибини залягання кабельної лінії одночасно здійснюється перевірка проходження траси цієї кабельної лінії.

Основною ознакою спотворення магнітного поля, а отже і помилкового визначення місцерозташування траси та вимірювання глибини залягання кабельної лінії є нерівність: $L_1 \neq L_2$, причому, якщо відмінність між цими величинами перевищує 15...20%.

Для проведення достовірніших вимірювань необхідно спробувати змінити шлях проходження зворотного струму, як вказано вище.

2.5 Методика точного визначення місцезнаходження пошкодження кабельної мережі індукційним методом

2.5.1 Точне визначення місця пошкодження кабелю після попереднього визначення зони дистанційним імпульсним методом

Для швидкого визначення точного місцезнаходження місця пошкодження кабельної мережі на трасі необхідно спочатку скористатися одним з дистанційних методів, а потім індукційним трасовим методом [13].

До дистанційних методів, перш за все, відносяться імпульсні методи (локаційний і хвильовий). Ці методи дозволяють вказати зону знаходження місця пошкодження, тобто орієнтовне місце знаходження пошкодження.

Знання зони знаходження пошкодження кабельної лінії дозволяє істотно скоротити час обходу траси з індукційним трасошукачем і точно знайти місце пошкодження.

Найпоширенішим з дистанційних методів є локаційний метод, який називається також методом відображених імпульсів або TDR-методом (методом рефлектометрії у тимчасовій області).

При локаційному методі у кабельну лінію посилають короткі імпульсні сигнали (наносекундної тривалості), приймають відображені сигнали з лінії і визначають відстань до місця пошкодження по тимчасовій затримці відображеного сигналу від пошкодження щодо посланого. Послані сигнали разом з відображеними утворюють рефлектограму лінії.

При визначенні відстані до місця простого пошкодження (короткого замикання, низькоомного витоку, обриву) аналіз рефлектограми може здійснюватися приладом автоматично, наприклад у приладі "РЕЙС-105Р"

фірми СТЕЛЛ, або "вручну" оператором, наприклад в приладах РЕЙС-105Р, Р5-10 або Р5-13 та ZQ2-11.

Визначення відстані як до простих, так і до складних пошкоджень, можна здійснювати приладами і системами, розробленими фірмами СТЕЛЛ: "РЕЙС-105Р", "Р5-17" і "К6Р-5", RFT.

Характерний вид рефлектограми кабельної лінії з дефектом у вигляді короткого замикання показаний на рисунку 2.6.

На рисунку 2.6 початок посланого (зондуючого) імпульсу відмічений нульовим курсором (проріджена вертикальна лінія), а початок відображеного імпульсу відмічений вимірювальним курсором (суцільна вертикальна лінія). Відстань між курсорами відповідає відстані до місця пошкодження, яке відображається в елементі таблиці " $L=$ ".

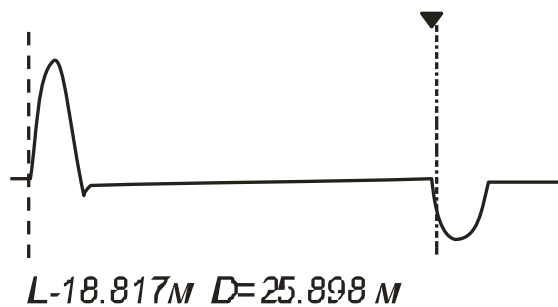


Рисунок 2.6 - Характерний вид рефлектограми кабельної лінії з дефектом у вигляді короткого замикання

Локаційний метод дозволяє надійно визначити відстань до зони розташування місця пошкодження тільки у тому випадку, якщо вдається виділити сигнал, відбитий від місця пошкодження, на фоні завад. Це можливо у двох випадках.

У першому випадку мають місце прості пошкодження, коли віддзеркалення від них по амплітуді перевищують віддзеркалення від неоднорідностей хвильового опору і випадкових завад.

У другому випадку віддзеркалення від місця пошкодження можуть бути по амплітуді у багато разів меншими, ніж випадкові завади або наводки, проте

використовуючи нові можливості комп'ютеризованих приладів вдається відлаштуватися від вказаних перешкод.

На рисунку 2.7 приведена рефлектограма кабельної лінії з дуже великим рівнем завад і наводок без використання можливостей по їх відбудові. Очевидно, що через перешкоди (завади) визначити відстань до зони розташування місця дефекту не представляється можливим. У цих умовах неможливо визначити відстань ні вітчизняними приладами, ні багатьма зарубіжними приладами аналогічного призначення.

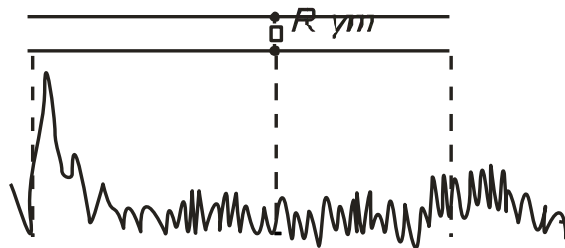


Рисунок 2.7 - Рефлектограма кабельної лінії з дуже великим рівнем завад і наводок без використання можливостей по їх відбудові

Комп'ютеризовані методи відбудови дозволяють у багато разів знизити рівень випадкових перешкод і наводок, залишаючи незмінною амплітуду сигналу, відбитого від місця пошкодження.

На рисунку 2.8 показана та ж рефлектограма кабельної лінії, але після обробки програмою відлаштування від завад

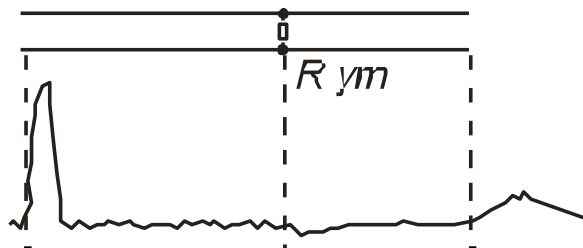


Рисунок 2.8 - Рефлектограма кабельної лінії з дуже великим рівнем завад після обробки програмою відлаштування від завад

Найскладнішим технічним завданням є визначення відстані до місць складних пошкоджень, коли амплітуда відбитого сигналу значно поступається

рівню випадкових завад та відбиттів від неоднорідностей самого кабелю. Виявити такі дефекти звичайним локаційним методом без допоміжного обладнання неможливо.

Це пояснюється тим, що стандартна локація проводиться на знеструмлених лініях. Однак складні дефекти часто проявляють себе лише під робочою або випробувальною напругою, яка дестабілізує стан ізоляції. Тому на "холодному" кабелі такі пошкодження залишаються непомітними.

Для посилення відбитого сигналу в силових кабелях застосовують метод попереднього пропалювання дефектної ізоляції за допомогою спеціальних установок. Головна мета цієї процедури — знизити перехідний опір у місці аварії до одиниць Ом, фактично перетворюючи складне пошкодження на просте. Зниження опору дозволяє ефективно використовувати як локаційні, так і індукційні методи пошуку.

Втім, у деяких ситуаціях пропалювання не дає бажаного результату. Це трапляється при так званих "запливаючих" пробоях, коли утворений канал швидко заповнюється маслом, або при потраплянні вологи всередину кабелю.

Для діагностики таких випадків використовують хвильові методи, реалізовані у сучасних комплексах, наприклад, у системі К6Р-5. Вона працює у парі з приєднувальним пристроєм та високовольтним генератором. Залежно від принципу дії розрізняють хвильовий метод напруги та хвильовий метод струму.

При використанні методу напруги на кабель подають високу напругу, яку плавно піднімають до моменту пробоя. Хвиля напруги, що виникає в цей момент, поширюється лінією, відбивається від її кінців та місця дефекту, і фіксується пам'яттю приладу.

Хвильовий метод струму передбачає подачу потужного високовольтного імпульсу, який провокує пробій у слабкому місці. Цей пробій діє як коротке замикання, викликаючи повне відбиття хвилі, характеристики якої записуються комп'ютером для подальшого розрахунку відстані.

Після того, як дистанційними методами встановлено зону аварії, до лінії підключають генератор, а оператор із індукційним приймачем вирушає на

місцевість. У визначеному районі спочатку уточнюють трасу пролягання кабелю, потім локалізують точну точку пошкодження і, нарешті, вимірюють глибину залягання лінії. Такий алгоритм дозволяє суттєво зекономити час, уникнувши необхідності обстежувати всю довжину траси.

2.5.2 Точне визначення місця пошкодження без попереднього визначення зони

За відсутності обладнання для дистанційного вимірювання відстані до місця аварії локалізацію пошкодження можна виконати, використовуючи лише індукційний комплект, що складається з генератора та приймача. Існує два основні методи виконання таких робіт.

Перший спосіб полягає у безпосередньому проходженні вздовж траси. Після підключення генератора оператор із приймачем рухається маршрутом пролягання кабелю від його початку до точки пошкодження. Однак цей підхід має суттєві недоліки: він вимагає значних часових витрат, особливо на протяжних лініях. Додаткові ускладнення створює складний рельєф місцевості (схили, заболочені ділянки), проходження траси під будівлями або погодні умови, наприклад, глибокий сніг. Через низьку ефективність цей метод на практиці застосовують рідко.

Більш раціональним є метод послідовного наближення. Його суть полягає в алгоритмічному звуженні зони пошуку. Після подачі сигналу в лінію оператор вирушає в точку, що відповідає приблизній середині кабельної траси. Там він перевіряє наявність електромагнітного поля, рухаючись перпендикулярно до осі кабелю.

Логіка пошуку наступна: відсутність сигналу свідчить про те, що обрив стався на ділянці від початку лінії до поточної точки; наявність сигналу вказує, що пошкодження знаходиться далі, ближче до кінця лінії. Визначивши напрямок, оператор переміщується в середину наступного відрізка (наприклад, на чверть довжини від кінця), і повторює вимірювання.

Значну частину відстані між контрольними точками доцільно долати на автомобілі, переходячи на піший режим лише на фінальному етапі, коли зона пошуку звузиться до 100–400 метрів. Цей метод дозволяє суттєво зекономити час. Наприклад, для лінії довжиною 10 км достатньо всього п'яти етапів наближення, щоб скоротити зону огляду до менш ніж 320 метрів. Завдяки високій продуктивності саме цей алгоритм рекомендується для використання з розробленим приладом.

2.6 Розробка конструкції ІВС для визначення пошкоджень підземних та наземних кабельних мереж

2.6.1 Розробка структурної схеми ІВС для визначення місць пошкодження підземних кабельних мереж

Ключовими вимогами до обладнання для пошуку дефектів у підземних кабельних лініях є здатність працювати в режимі реального часу, забезпечувати високий коефіцієнт підсилення та ефективну селекцію корисного сигналу.

Конструкція приладу включає магнітну антену (МА), каскад фільтрів (смугозагороджувальні СМЗФ1 і СМЗФ2, смугопропускаючий СПФ, резонансний РФ), блок підсилювачів (попередні ПП1 та ПП2, керований КП, звуковий ЗП), а також вимірювальний випрямляч (ВВ), пристрій індикації (ПІ) та головні телефони (ГТ). Система живлення складається з акумуляторної батареї (АКБ), перетворювача напруги (ПН) і стабілізатора (СТ).

Принцип роботи пристрою полягає в наступному. Електромагнітний сигнал, прийнятий антеною, спершу надходить на смугозагороджувальні фільтри. Вони налаштовані на різні частоти і відсікають перешкоди, що знаходяться за межами робочого діапазону, підвищуючи завадозахищеність. Оскільки використання пасивних LC-елементів у фільтрах призводить до

ослаблення сигналу, для компенсації втрат застосовується перший попередній підсилювач (ПП1). Для досягнення оптимального співвідношення сигналу до шуму в схемі передбачено керований підсилювач (КП) зі змінним коефіцієнтом підсилення.

Наступним етапом є точне виділення робочої частоти, що виконується послідовно через смугопропускаючий (СПФ) та резонансний (РФ) фільтри. Після цього сигнал знову підсилюється блоком ПП2 і розділяється на два канали. Перший канал спрямовує сигнал через звуковий підсилювач на навушники, дозволяючи оператору здійснювати акустичний контроль. Другий канал через випрямляч подає сигнал на індикатор для візуального відображення рівня.

Енергозабезпечення вузлів здійснюється від акумулятора через перетворювач, який формує необхідні номінали напруги, а стабілізатор утримує їх на заданому рівні. Така архітектура дозволяє оператору комплексно оцінювати ситуацію, орієнтуючись одночасно на звукові сигнали та покази приладу.

2.6.2 Розробка принципової електричної схеми ІВС

Враховуючи необхідність виділення вузької смуги частот, до електронних компонентів приладу для пошуку пошкоджень у кабельних мережах висуваються суворі вимоги щодо надійності та завадостійкості. Вимірjuвальний тракт базується на використанні електронних фільтрів та підсилювачів. Такий підхід дозволяє створити пристрій на аналоговій базі, який поєднує високі технічні параметри, простоту конструкції, зручність експлуатації та здатність працювати в режимі реального часу.

Електрична схема пристрою: входним елементом є магнітна антена, яка являє собою коливальний контур (C1, L1), налаштований на робочий діапазон частот. Для підвищення завадозахищеності застосовано смугозагороджувальні

фільтри на базі Т-подібних LC-ланок (L2-L4, C2-C4 та L5-L7, C5-C7). Попереднє підсилення сигналу здійснюється на мікросхемі DA1, а конденсатор C9 відокремлює цей каскад від керованого підсилювача (DA2), чутливість якого регулюється резистором R5. Далі сигнал проходить через Т-подібний смугопропускаючий фільтр (L8-L10, C12-C14) та резонансний фільтр (C18-C20, R19-R21). Посилення напруги забезпечує операційний підсилювач DA3, а компенсацію втрат сигналу після фільтрації виконує каскад на DA4.

Узгодження опорів між попереднім та звуковим підсилювачами реалізовано через повторювач напруги DA7, підключений через роздільні конденсатори C29 і C30. Звуковий тракт побудовано на елементах DA9 та транзисторах VT6, VT7, що забезпечують підсилення струму. Гучність сигналу в навушниках регулюється резистором R28, а конденсатор C31 коригує амплітудно-частотну характеристику в області низьких частот. Для візуальної індикації рівня сигналу використовується мікроамперметр PA1, підключений через активний вимірювальний випрямляч на базі DA8, який вирізняється лінійністю характеристик у широкому частотному діапазоні.

Система живлення спроектована на основі несиметричного імпульсного перетворювача, що дозволило зменшити вагу та габарити приладу. Блок складається з генератора імпульсів (DD1, VT5), підсилювача потужності (VT3, VT4), високочастотного трансформатора T1, вхідного (VT1, VT2) та вихідного (DA5, DA6) стабілізаторів, а також випрямляча та вузла індикації.

Робота блоку живлення полягає у генерації прямокутних імпульсів, які підсилюються та подаються на трансформатор. Енергія передається на двопівперіодний випрямляч, де сигнал згладжується та фільтрується. Отримана напруга стабілізується двополярним стабілізатором і використовується для живлення основних схем приладу, тоді як вхідний стабілізатор забезпечує роботу мікросхем.

2.6.3 Аналіз схемотехнічних рішень електронних фільтрів для ІВС

Для отримання достовірних даних про місцезнаходження кабельної мережі необхідно мати сигнал від індукційного давача у режимі реального часу з низьким рівнем шуму, на який вплив завад був би мінімальним. Це можна зробити за допомогою електричних фільтрів [17].

Електричними фільтрами прийнято вважати чотиріполіусники, які вмикаються між джерелом живлення змінної напруги і навантаженням. Їхнім призначенням є можливість без затухання пропускати до навантаження струми одних частот і затримувати, або пропускати, але з великим затуханням струми інших частот.

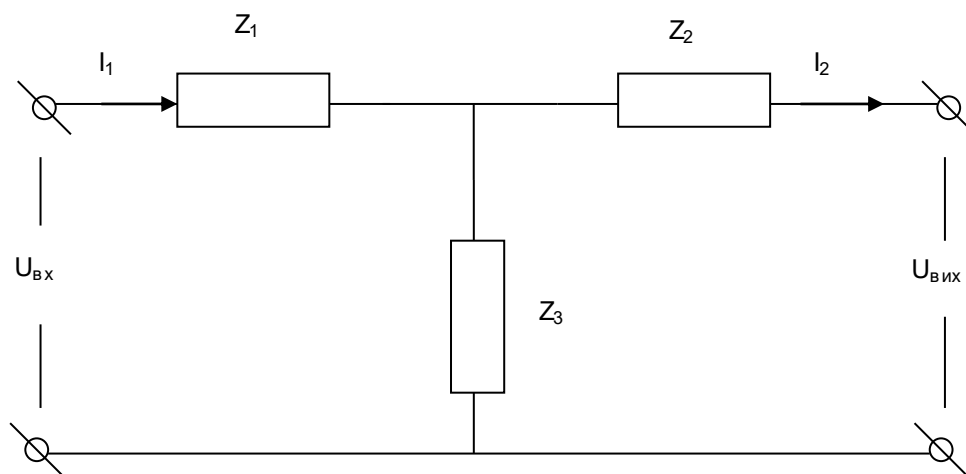
Діапазон частот, що пропускаються фільтром без затухання називається смугою прозорості, а діапазон частот, що пропускаються з затуханням – смугою затухання.

Електричні фільтри з високими крутизнами спаду і наростання виконуються з котушок індуктивності і конденсаторів. У випадку високого опору навантаження, або невисоких значень якісних характеристик використовуються RC-фільтри.

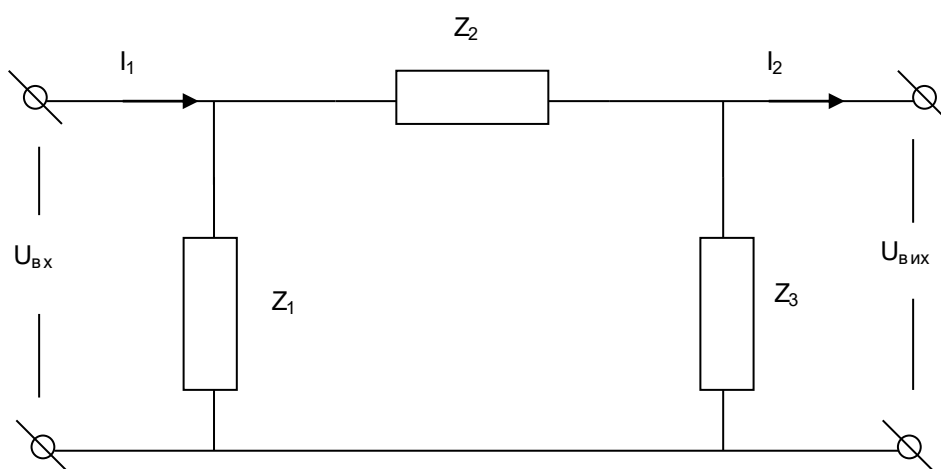
Як правило, фільтри будуються за симетричною Т, або П – подібними схемами (рисунок 2.9). Оскільки при ВЧ індуктивні опори котушок індуктивності є набагато більшими за їх активні опори, будемо вважати, що активні опори котушок і активні провідності конденсаторів рівні нулю, тобто, що фільтри складаються з ідеальних реактивних елементів з опором Z .

Опори Z_1 , в схемі на рисунку 2.9, а та Z_2 в схемі на рисунку 2.9, б прийнято називати поздовжніми, а Z_3 в схемі на рисунку 2.9, а та Z_1 в схемі на рисунку 2.9, б – поперечними.

Фільтри, у яких добуток поздовжнього опору на відповідний поперечний опір є постійним для даного фільтру числом (числом k), що не залежить від частоти, називаються k -фільтрами.



а



б

Рисунок 2.9 - Структурні схеми фільтрів

а – Т-подібний, б – П-подібний

Фільтри, у яких цей добуток залежить від частоти, називаються m -фільтрами.

Опір навантаження, який вмикається на виході фільтра повинен бути узгоджений з характеристиками опору фільтра. В k -фільтрах цей опір суттєво змінюється у залежності від частоти ω , що знаходиться у смузі прозорості. Це викликає необхідність зміни опору навантаження у функції від частоти.

В m -фільтрах при певних значеннях коефіцієнта m опір навантаження мало змінюється від частоти (в межах смуги прозорості), а тому навантаження може бути одним і тим самим по величині для різних значень ω .

Якість фільтра тим вища, чим різкіше зростає затухання у смузі затухання [17].

Для розрахунку параметрів фільтра необхідно знайти опори його ланок за коефіцієнтами чотириполосника A, B, C, D [17].

Для Т-подібного фільтра вхідну напругу та струм виразимо через вихідні напругу та струм:

$$I_1 = I_2 + \frac{U_{\text{вих}} + I_2 \cdot Z_2}{Z_3} = U_{\text{вих}} \frac{1}{Z_3} + I_2 \left(1 + \frac{Z_2}{Z_3} \right), \quad (2.2)$$

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вих}} + I_2 \cdot Z_2 + I_1 \cdot Z_1 = U_{\text{вих}} \left(1 + \frac{Z_1}{Z_3} \right) + I_2 \left(Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \right). \quad (2.3)$$

Тоді:

$$A = 1 + \frac{Z_1}{Z_3}, \quad (2.4)$$

$$B = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3}, \quad (2.5)$$

$$C = \frac{1}{Z_3}, \quad (2.6)$$

$$D = 1 + \frac{Z_2}{Z_3}. \quad (2.7)$$

Аналогічні викладки для П-подібної схеми матимуть вигляд:

$$(2.8) \quad A = 1 + \frac{Z_2}{Z_3},$$

$$B = Z_2, \quad (2.9)$$

$$C = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{Z_1 \cdot Z_3}, \quad (2.10)$$

$$D = 1 + \frac{Z_2}{Z_3}. \quad (2.11)$$

Відомо, що коли навантаження Z_n узгоджене з характеристичним опором Z_c чотириполосника, то напруга $U_{вих} = U_2$ і струм на навантаженні I_2 пов'язані з напругою $U_{вх} = U_1$ і струмом I_1 на вході чотириполосника наступними співвідношеннями:

$$U_2 = U_1 e^{-g}, \quad (2.12)$$

$$I_2 = I_1 e^{-g}, \quad (2.13)$$

де $g = \ln(A + \sqrt{B \cdot C}) = a + jb$.

Тоді

$$U_2 = U_1 e^{-a} e^{-jb}, \quad (2.14)$$

$$I_2 = I_1 e^{-a} e^{-jb}. \quad (2.15)$$

Множник e^{-a} визначає, у скільки разів модуль напруги (струму) на виході фільтра менший за модуль напруги (струму) на вході фільтра.

Якщо $a=0$, то $e^{-a} = e^0 = 1$ і фільтр пропускає коливання без затухання. Таким чином, в смузі прозорості $a=0$.

У смузі затухання $a>0$. Множник e^{-jb} , по модулю рівний нулю, свідчить про те, що напруга U_2 і струм I_2 відстають відповідно від U_1 і I_1 на кут b .

Фільтруючі властивості чотириполосника розглянемо шляхом порівняння виразу для коефіцієнта A чотириполосника з рівним йому виразом гіперболічного конуса від аргумента $a=jb$:

$$A = \operatorname{ch}(a + jb). \quad (2.16)$$

Гіперболічний конус від суми двох аргументів (з врахуванням того, що $\operatorname{ch} jb = \cos b$ і $\operatorname{sh} jb = j \sin b$) можна представити наступним чином:

$$\operatorname{ch}(a + jb) = \operatorname{ch} a \cdot \cos b = \operatorname{sh} a \sin b. \quad (2.17)$$

Для будь-яких фільтрів, зібраних за Т-схемою і П-схемою відношення опорів Z між собою завжди є дійсним числом – бо відношення двох уявних чисел завжди є дійсним числом.

Відповідно, завжди буде дійсним коефіцієнт A . Звідси дійсним повинен бути і вираз рівний йому $\operatorname{ch}(a + jb)$:

$$\operatorname{ch}(a + jb) = \operatorname{ch} a \cdot \cos b = \operatorname{sh} a \sin b = A. \quad (2.18)$$

Втраз (2.18) дійсний, якщо

$$\operatorname{sh} a \sin b = 0. \quad (2.19)$$

При цьому

$$\operatorname{ch} a \cos b = A. \quad (2.20)$$

Рівняння (2.19) і (2.20) використовують для визначення границь смуги прозорості і характеру зміни кута b в зоні прозорості, а також характеру зміни коефіцієнта згасання a в смузі згасання.

Рівність (2.18) для смуги прозорості ($a=0$) задовільняється, оскільки $\operatorname{sh} a = \operatorname{sh} 0 = 0$. В силу того що $\operatorname{ch} 0 = 1$, рівняння (2.20) для смуги прозорості переходить в наступне:

$$\cos b = A. \quad (2.21)$$

Круговий конус ($\cos b$) може змінюватися в межах від +1 до -1. Тому крайні значення коефіцієнта A (що є функцією частоти $A(\omega)$) в смузі прозорості рівні ± 1 . Смуга прозорості в загальному випадку лежить в діапазоні

частот від ω_1 до ω_2 . Значення ω_1 і ω_2 для фільтрів НЧ і ВЧ визначається шляхом розв'язання наступного рівняння:

$$A(\omega) = \pm 1. \quad (2.22)$$

Для смугових та загороджуючих фільтрів ω_1 і ω_2 знаходять як корені рівняння $A(\omega) = -1$. Для них рівняння $A(\omega) = 1$ дає можливість визначити так звану резонансну частоту ω_0 , що знаходиться в інтервалі між ω_1 і ω_2 .

Частоту, що є граничною між смугою прозорості і смугою затухання, називають частотою зрізу.

Характер зміни кута b у функції від ω для смуги прозорості визначається у відповідності з рівнянням (2.21) наступним чином:

$$b = \arccos A(\omega). \quad (2.23)$$

Визначаємо a і b для смуги затухання. В смузі затухання $a > 0$. Рівняння (2.19) задовільняється при умові:

$$\sin b = 0, \quad (2.24)$$

тобто при

$$b = 0 \quad (2.25)$$

і (або)

$$b = \pm\pi. \quad (2.26)$$

Згідно рівнянню (2.20), при $b = 0$:

$$\operatorname{cha} = A(\omega), \quad (2.27)$$

а при $b = \pm\pi$

$$\operatorname{cha} = -A(\omega). \quad (2.28)$$

Рівняння (2.27) і (2.28) дозволяють за значенням A як функції ω знайти cha в смузі затухання, а за cha знайти a і, таким чином, побудувати криву $a = f(\omega)$. З рівнянь (2.25), (2.26) виходить, що в смузі затухання напруга U_2 на виході фільтра знаходиться або в фазі (при $b = 0$), або в протифазі (при $b = \pm\pi$) з напругою U_1 на вході фільтра.

При цьому необхідно відмітити, що:

Зі зміною частоти ω змінюються коефіцієнти B і C чотириполосника,

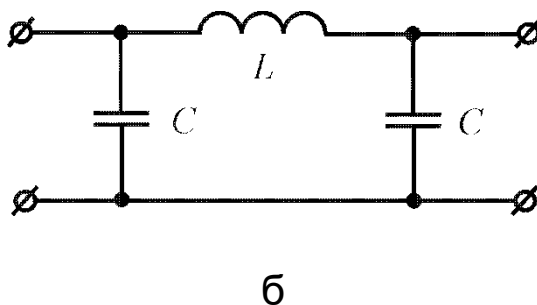
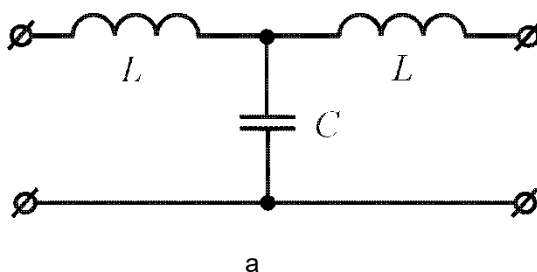
тому змінюється і характеристичний опір $Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}}$. Для того, щоб фільтр працював на узгоджене навантаження, при зміні частоти потрібно змінювати і опір навантаження.

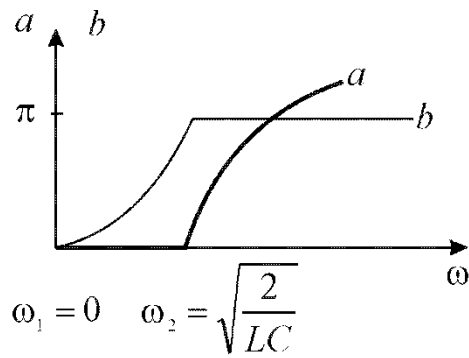
У смузі прозорості характеристичний опір фільтра завжди активний, а у смузі затухання – чисто реактивний (індуктивний або ємнісний).

Розглянемо, як класифікуються фільтри по відношенню до опрацьовуваної смуги частот.

Фільтрами низької частоти (ФНЧ) називають фільтри, що пропускають на навантаження лише низькі частоти: від $\omega_1 = 0$ до ω_2 . Смуга їх затухання знаходиться на інтервалі від ω_2 до ∞ .

Схеми двох ФНЧ наведені на рисунку 2.10, а, б. Характер зміни коефіцієнта затухання a і коефіцієнта фази b якісно зображають криві на рисунку 2.10, в.





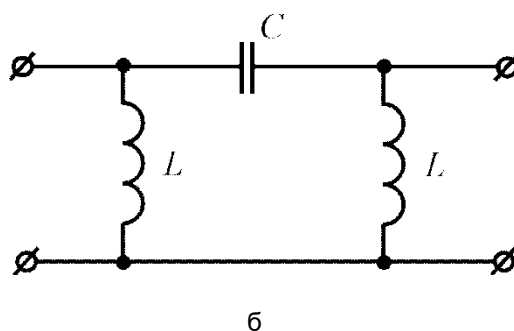
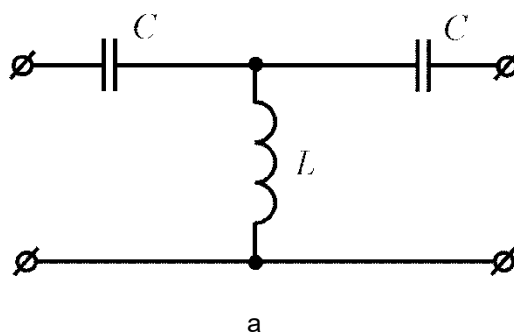
В

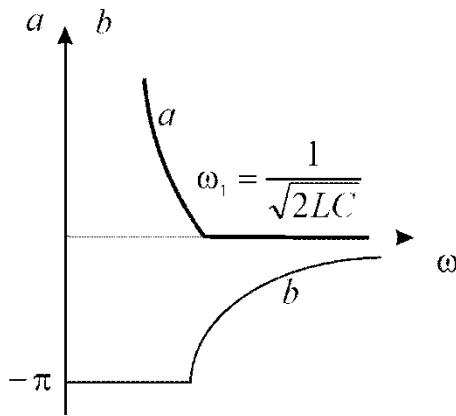
Рисунок 2 10 – Схеми фільтрів низьких частот

а – П-подібний ФНЧ; б –Т- подібний ФНЧ;в – Характер зміни коефіцієнта згасання a і коефіцієнта фази b

Під фільтрами високої частоти (ФВЧ) розуміють фільтри, що пропускають на навантаження лише високі частоти: від ω_1 до ∞ . Смуга їх згасання знаходиться на інтервалі від 0 до ω_1 .

Схеми двох ФВЧ наведені на рисунку 2.11, а, б. Характер зміни коефіцієнта згасання a і коефіцієнта фази b якісно зображають криві на рисунку 2.11, в.





в

Рисунок 2.11 – Схеми фільтрів високих частот

а – П-подібний ФВЧ; б –Т- подібний ФВЧ;в – Характер зміни коефіцієнта згасання а і коефіцієнта фази б

Розглянемо зміну величини характеристичного опору Z_c у смузі прозорості для Т-фільтра НЧ (рисунок 2.10, а) і для Т-фільтра ВЧ (рисунок 2.11,

а), а також для П-фільтрів. З цією метою у вираз $Z_c = \sqrt{\frac{B}{C}}$ підставимо значення B і C у відповідності з формулами (2.4) – (2.11) і проаналізуємо отримані вирази.

Для Т-фільтра НЧ (рисунок 2.10, а):

$$Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C} - \omega^2 L^2}. \quad (2.29)$$

При $\omega = \omega_1 = 0$ $Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}$. Зі збільшенням частоти Z_c зменшується,

спочатку мало відрізняючись від значення $Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}$. При досягненні значення

$$\omega = \omega_2 = \sqrt{\frac{2}{L \cdot C}} \quad Z_c = 0.$$

Для П-фільтра НЧ (рисунок 2.10, б):

$$Z_c = \left(\frac{2C}{L} - \omega^2 C^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.30)$$

Для Т-фільтра ВЧ (рисунок 2.11, а):

$$Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C} - \frac{1}{\omega^2 C^2}}. \quad (2.31)$$

В цьому випадку характер зміни Z_c відрізняється від характеру зміни Z_c для Т-фільтра НЧ, а саме:

$$Z_c = 0 \text{ при } \omega = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{2L \cdot C}}. \text{ Зі збільшенням } \omega \text{ опір } Z_c \text{ збільшується і}$$
$$\text{при } \omega \rightarrow \infty \quad Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}.$$

Для П-фільтра ВЧ (рисунок 2.11, б):

$$Z_c = \left(\frac{2C}{L} - \frac{1}{\omega^2 L^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.32)$$

Якщо фільтр призначений для роботи на частотах, що знаходяться в середині смуги прозорості даного фільтра і відносно далеко відстаючих від значення ω , при якому $Z_c = 0$, то опір навантаження Z_n на виході фільтрів НЧ вибирають рівним Z_c , який відповідає $\omega = \omega_1 = 0$. Для Т-фільтра НЧ (рисунок

$$2.13, \text{ а}) \quad Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}.$$

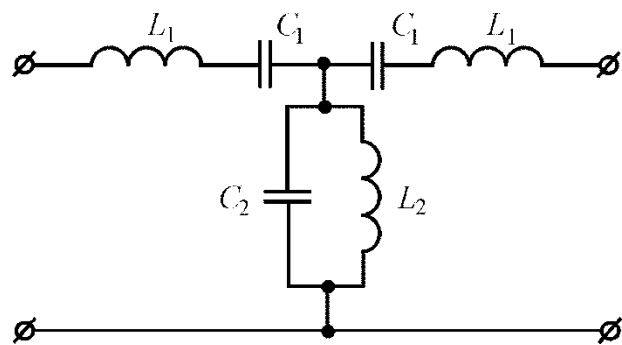
Для фільтрів ВЧ звичайно навантаження узгоджують зі значенням Z_c при $\omega \rightarrow \infty$. Для Т-фільтра ВЧ (рисунок 2.11, а) $Z_c = \sqrt{\frac{2L}{C}}$. У смузі (смугах) затухання Z_c виявляється чисто реактивним для всіх типів к-фільтрів.

Для того щоб вяснити, індуктивний чи ємнісний характер має Z_c в смузі затухання, необхідно визначити характер вхідного опору цього фільтра для граничного режиму, а саме: для фільтрів НЧ (рисунок 2.10, а, б) при дуже високій частоті, а для фільтрів ВЧ (рисунок 2.11, а, б) при дуже низькій частоті (теоретично при $\omega \rightarrow \infty$), вважаючи виходи схем закороченими. Такий же

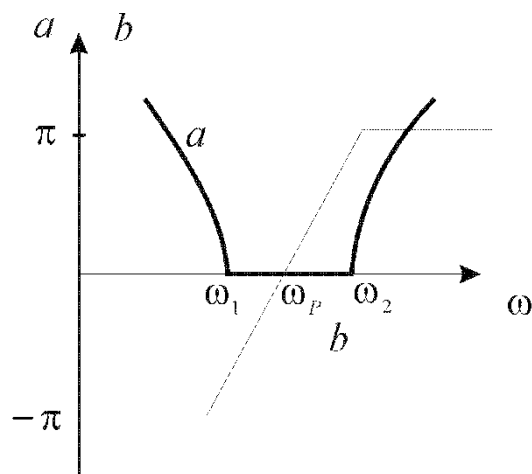
результат буде отриманий, якщо вважати їх розімкненими. В результаті визначемо, що в зоні затухання Z_c має індуктивний характер для Т-фільтра НЧ (рисунок 2.10, а) і П-фільтра ВЧ (рисунок 2.11, б) і ємнісний характер для П-фільтра НЧ (рисунок 2.10, б) і Т-фільтра ВЧ (рисунок 2.11, а).

Смугові фільтри являють собою фільтри, що пропускають на навантаження лише вузьку смугу частот від ω_1 до ω_2 . Зліва від ω_1 і справа від ω_2 знаходяться смуги затухання. Схема простого смугового к-фільтра зображена на рисунку 2.12, а. Параметри схеми повинні задовільняти умову $L_1C_1 = L_2C_2$.

Характер зміни a і b для смугового фільтра зображають криві на рисунку 2.12, б.



а



б

Рисунок 2.12 – Схема смугового фільтра

а – Т-подібний смуговий фільтр; б - Характер зміни коефіцієнта затування a і коефіцієнта фази b

Формули для визначення параметрів смугового фільтра (рисунок 2.12, а) за заданими частотами f_1 і f_2 і опором навантаження Z_c при резонансній частоті $f_p = \frac{\omega_p}{2\pi}$:

$$f_p = \sqrt{f_1 f_2}, \quad (2.33)$$

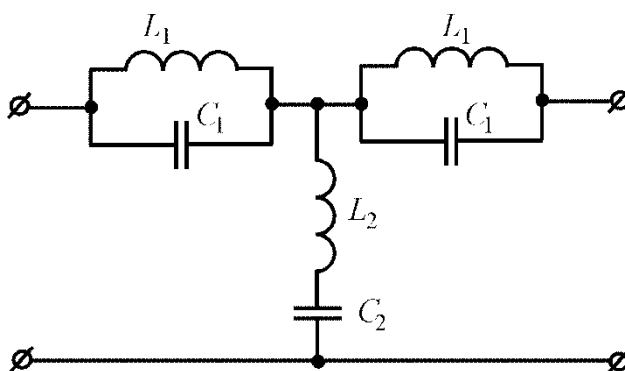
$$C_1 = \frac{f_2 - f_1}{2\pi f_1 f_2 Z_c}, \quad (2.34)$$

$$L_1 = \frac{Z_c}{2\pi(f_2 - f_1)}, \quad (2.35)$$

$$C_2 = \frac{1}{\pi(f_2 - f_1)Z_c}, \quad (2.36)$$

$$L_2 = \frac{Z_c(f_2 - f_1)}{4\pi f_1 f_2}. \quad (2.37)$$

Під загороджувальними фільтрами (рисунок 2.13, а) розуміють фільтри, в яких смуга прозорості наче розрізана на дві частини смуги затування (рисунок 2.13, б). Зліва від ω_1 і справа від ω_2 знаходяться дві частини смуги прозорості.



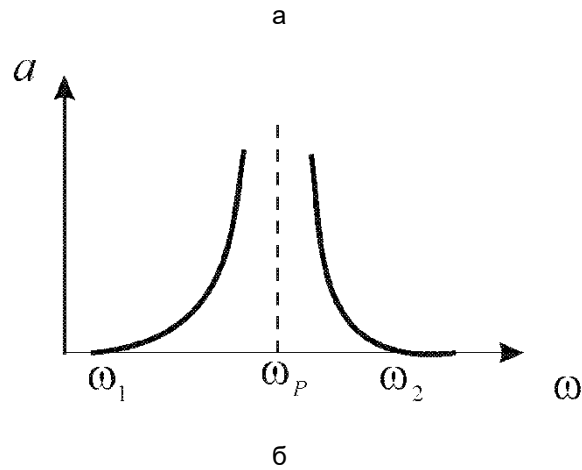


Рисунок 2.13 – Схема загороджувального фільтра

а – Т-подібний загороджувальний фільтр;

б - Характер зміни коефіцієнта згашення a і коефіцієнта фази b

У схемі простого загороджуючого фільтра на рисунку 2.13, а $L_1 C_1 = L_2 C_2$.

Позначимо $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ і $k = \frac{L_1}{L_2}$ і запишемо формули для визначення ω_1 ,

ω_2 і Z_c фільтрів, що на рисунку 2.12, а і 2.13, а.

Для рисунка 2.12, а:

$$\omega_{1,2} = \frac{\omega_p}{\sqrt{2k}} \left(\sqrt{1 + 2k} \mp 1 \right), \quad (2.38)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{2L_2}{C_1}} \sqrt{1 - \frac{k}{2} \left(\frac{\omega_p}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2}. \quad (2.39)$$

Для рисунка 2.13, а:

$$\omega_{1,2} = 0,25\omega_p \left(\sqrt{16 + 2k} \mp \sqrt{2k} \right), \quad (2.40)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{2L_1}{C_2}} \sqrt{1 - \frac{0,5k}{\left(\frac{\omega_p}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_p} \right)^2}}. \quad (2.41)$$

Для фільтра (рисунок 2.12, а) в області частот від 0 до ω_1 Z_c має ємнісний характер, а в області частот від ω_1 до ω_p Z_c має індуктивний характер, а в області від ω_p до ω_2 - ємнісний.

Характер зміни Z_c зображено кривими на рисунках 2.12, в і 2.13, в.

Для точного виділення вузької смуги частот використовуються вибіркові підсилювачі з квазірезонансними фільтрами [18]. У цих фільтрах використовуються дві Т – подібні RC – ланки, які складаються з елементів: перша – C_1, C_2 і R_3 ; друга – R_1, R_2 і C_2). Напряга на виході кожної з вказаних Т – подібних ланок зсунута по фазі відносно вхідної напруги. При цьому напруга на виході першої Т – подібної RC – ланки випереджує вхідну напругу, а напруга на виході другої Т – подібної RC – ланки, навпаки, відстає від вхідної напруги. Ця обставина дає змогу при паралельному сполученні двох Т – подібних RC –ланок отримати на виході (на певній частоті) при певних співвідношеннях значень елементів R і C рівні за амплітудою, але протилежні по фазі напруги. при цьому результуюча напруга на виході подвійного Т – подібного фільтра буде рівна 0. Частотна характеристика такого фільтра має яскраво виражений вузький пік.

Квазірезонансна частота f_0 , при якій коефіцієнт передачі подвійного Т – подібного фільтра буде мати найменше значення, залежить від величини параметрів елементів ланок:

$$f_0 = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sqrt{(C_1 + C_2) / (C_1 C_2 R_1 R_2)}$$

(2.42)

Часто використовуються симетричні Т – подібні RC – фільтри, у яких $R_1=R_2=2R_3=R$; $C_1=C_2+C_3/2=C$. Квазірезонансна частота f_0 такого фільтра розраховується з виразу:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

(2.43)

Подвійний Г – подібний фільтр включається в ланку зворотного зв'язку підсилювача напруги. При цьому на квазірезонансній частоті фільтр вносить максимальне затухання у сигнал, що проходить з виходу на вхід. Тому глибина зворотного зв'язку буде рівною практично 0 і підсилення сигналу буде максимальним. На частоті, що відрізняється від квазірезонансної, затухання, що вноситься фільтром буде зменшуватись. При цьому зворотній зв'язок зростає і відповідно, зменшується рівень сигналу. Частотна характеристика такого підсилювача нагадує резонансну характеристику коливального контуру.

Розрахунок фільтрів, який наведений у додатку А, здійснюється за наведеною у підрозділі 2.6.3 методикою.

2.7 Розробка складальних креслень корпусу ІВС та плати його блоку живлення

Корпус приладу має портативну Г-подібну конструкцію, що полегшує роботу з ним. З метою покращення ергономіки всі елементи керування згруповано на передній панелі. Особливістю конструкції є рухома штанга, яка дозволяє змінювати кут нахилу магнітної антени у вертикальній та горизонтальній площинах відповідно до обраної методики вимірювань.

Основні елементи приладу включають корпус, у якому розміщено магнітну антену на штанзі; підключення антени до електронного блоку виконано через джгут проводів. Для фіксації положення антени та регулювання висоти штанги передбачено спеціальні гвинти. Усередині корпусу змонтовано модулі фільтрації, вимірювання та живлення. Для перенесення пристрою використовується ручка-тримач. Захист внутрішніх компонентів від впливу навколишнього середовища забезпечують захисні кришки та панель, а герметичність з'єднань досягається за допомогою втулок. Механічна міцність складання гарантується системою гвинтових кріплень.

На панелі керування розташовані регулятори гучності звуку в навушниках та чутливості приладу. Для візуального відображення рівня сигналу застосовано стрілочний мікроамперметр. Увімкнення живлення здійснюється тумблером, про що сигналізує світлодіодний індикатор.

Друкована плата блоку живлення виготовляється зі склотекстоліту марки СФ-2 з дотриманням стандартних конструкторських норм (крок сітки 2,5 мм, мінімальна відстань між компонентами 1 мм тощо). Готову плату рекомендується екранувати за допомогою мідної фольги. Це необхідно для захисту чутливих входних підсилювачів від високочастотних перешкод, що можуть виникати під час роботи імпульсного блоку живлення.

3 МЕТРОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ІВС ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ У ПІДЗЕМНИХ ТА НАЗЕМНИХ КАБЕЛЬНИХ МЕРЕЖ

Розроблена ІВС для визначення місця пошкодження підземних кабельних мереж є засобом вимірювальної техніки який має певні похибки вимірювань, вплив яких на результати досліджень може бути досить суттєвим. Для оцінки цього впливу необхідно провести аналіз похибок.

3.1 Аналіз видів похибок

Забезпечення високої прецизійності вимірювань є непростим завданням, вирішенням якого займається метрологія. Для дослідників та технологів ключовим показником є підсумкова похибка отриманих даних. Оскільки ця величина формується під впливом багатьох чинників, виникла потреба у їх класифікації за різними критеріями.

Основними параметрами, що описують результати вимірювань, виступають їхня точність та достовірність. Точність відображає якість вимірювального процесу і є обернено пропорційною до величини похибки, тоді як достовірність визначає рівень довіри до отриманої інформації.

За характером прояву похибки традиційно поділяють на систематичні та випадкові. Окремо виділяють грубі похибки, або промахи, значення яких суттєво виходять за межі очікуваних результатів для конкретних умов проведення експерименту.

Залежно від джерела виникнення похибки класифікують на: інструментальні, що пов'язані з недосконалістю використовуваних засобів вимірювання; методичні, які викликані недоліками обраного методу; похибки відліку, що виникають через неточність фіксації показів; а також похибки

інтерполяції, зумовлені суб'єктивною оцінкою положення вказівника між поділками шкали. За способом представлення розрізняють абсолютні похибки, виражені в одиницях вимірюваної величини, та відносні.

У межах даного дипломного проекту аналіз обмежується оцінкою інструментальної похибки інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) та визначенням головних джерел випадкових похибок. Повноцінне оцінювання методичних та систематичних складових вимагає проведення натурних експериментів на реальних об'єктах в умовах експлуатації, що виходить за рамки цієї роботи. Таким чином, результуюча похибка в цьому теоретичному дослідженні розраховується як сукупність інструментальних і випадкових складових. Загальна схема накопичення похибок під час вимірювань представлена на рисунку 3.1.

3.2 Похибки розробленої інформаційно-вимірювальної системи

Згідно структурної схеми ІВС для визначення місця пошкодження підземних кабельних мереж його вимірювальний канал складається з наступних блоків: магнітної антени, смугозагороджувальних фільтрів, попереднього підсилювача, керованого підсилювача, смугопропускаючого фільтра, резонансного фільтра, попереднього підсилювача, вимірювального випростовувача, пристрою індикації. Кожен блок каналу спотворює вимірювальний сигнал, що пов'язано із зміною передавальної характеристики блоку при різних значеннях сигналу, відповідно вносить похибку у результат вимірювання градієнта магнітного поля. Звідси результуюча інструментальна похибка формується з наступних складових:

δ_{ma} - похибка яку вносить магнітна антена,

$\delta_{сф1,2}$ - похибка яку вносять смугозагороджувальні фільтри,

δ_{n1} - похибка яку вносить попередній підсилювач 1,

$\delta_{кп}$ - похибка яку вносить керований підсилювач,

$\delta_{снф}$ - похибка яку вносить смугопропускаючий фільтр,

$\delta_{рф}$ - похибка яку вносить резонансний фільтр,

δ_{n2} - похибка яку вносить попередній підсилювач 2,

δ_{en} - похибка яку вносить вимірювальний випростовувач,

δ_{ni} - похибка яку вносить пристрій індикації.

Проаналізуємо і оцінимо кожен з наведених похибок.

У спроектованій ІВС для визначення пошкоджень у підземних та наземних кабельних мережах у якості первинного перетворювача (магнітної антени) напруженості магнітного поля в напругу пропонується застосувати ферозонд типу НВ0391-35 як магнітотулаційний давач з низьким дрейфом нуля. Для оцінки $\delta_{ма}$ скористаємося основними паспортними характеристиками ферозонду, що представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Основні паспортні характеристики ферозонду НВ0391-35

Найменування показника	Одиниці вимірювання	Значення
Діапазон вимірювання	мкТл	1000
Дрейф нульового рівня	мкТл	$\pm 0,002$
Коефіцієнт передачі (для другої гармоніки)	мкВ/мкТл	200

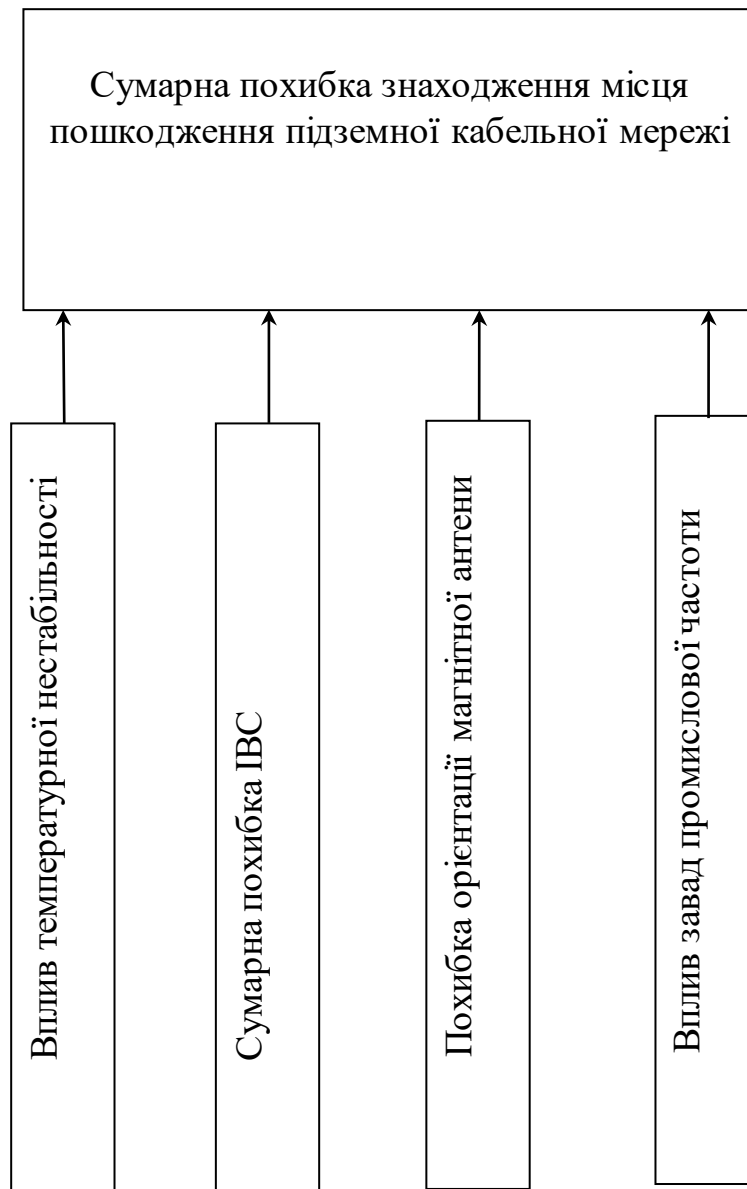


Рисунок 3.1 – Фактори, що впливають на точність знаходження пошкодження підземної кабельної мережі

Звідси можна визначити, що максимальна вихідна напруга перетворювача при заданому діапазоні вимірювання становитиме $U_{\text{вих}}=0,2 \pm 0,0004$ В, звідки $\delta_{\text{ма}}=0,2\%$.

Смугозагороджувальні фільтри СМЗФ1 і СМЗФ2 мають різні частоти смуг загородження, які вирізають частоти завади перед і після смуги з робочою частотою, підвищуючи цим завадостійкість ІВС. Ці фільтри з метою підвищення якості фільтрації виконано на пасивних LC – ланках, поміщених у

електромагнітний екран. Тут похибка залежатиме від точності виготовлення котушок індуктивності та від впливу температури на їхній мідний дріт. У даних фільтрах котушки виконуються намоткою типу «універсаль» з пермалоевими підстроєчними осердями. Конденсатори фільтрів вибрано типу КМ-6 з допуском номіналу $\pm 1\%$ і з температурним коефіцієнтом $\alpha = 20 \cdot 10^{-5} \text{ 1}^\circ\text{C}$. У сумі похибка смугозагороджувальних фільтрів, після підгонки їхніх параметрів, становить $\delta_{cf1,2} = 0,8\%$.

Попередній підсилювач 1 здійснює лінійне підсилення сигналу, що знімається з пасивних фільтрів. Попередній підсилювач виконано по стандартній схемі інвертуючого підсилювача, що представляє собою функціонально завершений блок із збалансованими параметрами. У підсилювачі похибка вноситься за рахунок температурної нестабільності і розкидом параметрів опорів резисторів, операційного підсилювача і завдяки нелінійності яку вносить операційний підсилювач. У даному підсилювачі проектованої ІВС застосовуються прецизійні резистори С2-29В і танталові конденсатори КМ-6 і КМ-3 з допуском номіналу $\pm 1\%$ і з температурним коефіцієнтом $\alpha = 50 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$, для порівняння широкоживані резистори типу МЛТ мають мінімальний допуск номіналу $\pm 5\%$ і температурний коефіцієнт опору $\alpha = 1270 \cdot 10^{-6} \text{ 1}^\circ\text{C}$. Отже застосування у підсилювачі змінного струму прецизійних резисторів дозволяє зменшити похибку до рівня яким на фоні похибки операційного підсилювача можна зменшити [8]. У ІВС застосовується високошвидкісний операційний підсилювач типу К140УД8А з низьким рівнем шуму. Згідно паспортних даних похибка яку вносить даний елемент і визначає похибку підсилювача, яка буде рівна $\delta_{n1} = 0,15\%$.

Для отримання оптимального співвідношення сигнал/завада використовується керований підсилювач. Керований підсилювач здійснює лінійне підсилення сигналу, що знімається з попереднього підсилювача 1 згідно з заданим в ручну коефіцієнтом підсилення. Попередній підсилювач також виконано по стандартній схемі інвертуючого підсилювача без частотної

корекції. Як і у попередньому підсилювачі похибка вноситься за рахунок температурної нестабільності і розкидом параметрів опорів резисторів, операційного підсилювача і завдяки нелінійності яку вносить операційний підсилювач та змінний резистор. У даному підсилювачі проєктованої ІВС застосовуються прецизійні резистори С2-29В і танталові конденсатори КМ-6 і КМ-3 з допуском номіналу $\pm 1\%$ і з температурним коефіцієнтом $\alpha = 50 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$.

Отже, застосування у підсилювачі змінного струму прецизійних резисторів дозволяє зменшити похибку до рівня яким на фоні похибки операційного підсилювача можна зменшити. У підсилювачі застосовується високошвидкісний операційний підсилювач типу К140УД8А з низьким рівнем шуму. Але основний шум буде вносити змінний резистор типу СП4-16 з допуском номіналу $\pm 2\%$. Звідси похибка керованого підсилювача становить $\delta_{кл} = 0,3\%$.

Смугопропускаючий фільтр служить для виділення робочої смуги частот сигналу. Він є пасивним і побудований за Т – подібною схемою. Елементи фільтра виконано як і у смугозагороджуючих фільтрах, звідки похибка його становитиме $\delta_{снф} = 0,4\%$.

Резонансний фільтр служить для точного виділення робочої частоти ІВС. Оскільки сигнал на нього подається вже достатньо потужним, а сам фільтр виконано на активних елементах, то допуски номіналу резисторів тут принципового значення не мають. Резонансний фільтр ІВС побудовано за схемою подвійного фазовертального моста з реактивними входним і вихідним опорами. У загальному випадку похибки, які вносить резонансний фільтр будуть визначатися залежністю входного опору фільтру від частоти сигналу, перевантажувальною здатністю, динамічною стійкістю, температурною залежністю і додатковими шумами. Похибку також будуть вносити сигнали із близькими до вимірюваних частотами. При використанні фільтру вищого порядку крім значного ускладнення конструкції з'являється загроза, що через

температурну нестабільність зміниться частота резонансу і весь корисний сигнал буде відділений фільтром. Крім того погіршуються динамічні характеристики.

Глибина смуги виділення сигналу резонансним фільтром становить 40 дБ, що є набагато вищим, ніж у інших типах фільтрів. Похибка резонансного фільтра становить $\delta_{pf} = 0,28\%$.

Попередній підсилювач 2 як і попередній підсилювач 1 здійснює лінійне підсилення сигналу, що знімається з фільтра, тільки вже не пасивного, а активного. Схемотехніка, застосовані елементи та похибки у нього такі ж як і у попереднього підсилювача 1, тобто $\delta_{n2} = 0,15\%$.

За допомогою вимірювального випростовувача здійснюється визначення абсолютного значення виміряного і перетвореного сигналу. Внаслідок використання у блоці нелінійного елемента в зворотному зв'язку виникають нелінійні спотворення через недостатню швидкість зростання напруги реального операційного підсилювача, який використовується в якості підсилювальної ланки. Крім того, особливістю зворотного зв'язку є провідність сигналу додатного знаку і непровідність від'ємного, що викликає спотворення при переході через нуль сигналу. Вплив цього фактору виражається в появі затягнутих фронтів сигналів на підвищених частотах внаслідок перенасичення вихідних каскадів реального операційного підсилювача. Для часткового усунення цієї похибки в схемі передбачено замикання зворотного зв'язку при появі сигналу із від'ємним знаком.

Ще один важливий фактор, що впливає на лінійність передачі сигналу є наявність постійної напруги зміщення реальних операційних підсилювачів. В результаті симетричний відносно нуля сигнал до перетворення, зміщується на виході детектора. Це викликає несиметричність напівхвиль сигналу на виході детектора, що викликає додаткові похибки нелінійності, особливо при вхідних сигналах, співрозмірних із напругами зміщення нуля операційного підсилювача. При використанні прецизійних пасивних елементів і прецизійних

операційних підсилювачів типу К140УД8, що мають низький дрейф нуля завдяки лазерній підгонці і не потребують зовнішніх ланок корекції. Для типових схем активних вимірювальних випростовувачів та на основі паспортних даних на К140УД8 похибка яку вносять цей блок становить $\delta_{vn} = 0,55\%$.

Похибка яку вносить пристрій індикації виникає внаслідок неточного встановлення стрілки індикатора. Для індикатора застосованого типу похибка становить $\delta_{ni} = 0,3\%$.

3.3 Визначення результуючої інструментальної похибки ІВС

Оскільки розроблена нами ІВС складається з ряду блоків та вузлів, то і основна допустима похибка буде теж складатись з складових похибок її блоків і вузлів. Значення цієї похибки може суттєво залежати від зовнішніх факторів, які впливають на роботу системи.

На практиці вимірювань часто постає задача визначення сумарної (результуючої) похибки по відомим значенням складових цієї похибки.

Знаходження сумарної систематичної похибки за відомими систематичними похибками сумуючих складових не викликає труднощів. У цьому випадку, при розрахунку приймають $r=0$, якщо випадкові складові можна рахувати невідомими, або рівними одиниці з знаком плюс або мінус, якщо помітна кореляція між сумуючими випадковими складовими похибки. Розглянемо більш детально сумування випадкових похибок.

Будемо вважати, що результуюча похибок вимірювань складається з n випадкових складових, які мають нормальний закон розподілу. Знаючи довірену імовірність і інтервал довіри для кожної складової похибки, можна знайти середньоквадратичне відхилення кожної із них за формулою:

$$\sigma_i = \frac{\delta_{im}}{z p_i} \quad (3.1)$$

де Z_{p_i} - коефіцієнт, взятий з таблиць для нормального розподілу і відповідної довіреної імовірності P_i .

Якщо імовірність довіри для всіх складових однакова і рівна P , тоді використовуючи вираз (3.1) дістанемо:

а) для корельованих складових:

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \pm \delta_{im}}{Z_p} \quad (3.2)$$

де знак \pm означає, що для складових з позитивною кореляцією \pm_i і \pm_{im} потрібно брати з знаком плюс, а для складової з негативною кореляцією – із знаком мінус;

б) для незалежних складових ($r_{ij}=0$):

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sqrt{\sum \delta_{im}^2}}{z_p} \quad (3.3)$$

При сумуванні складових, які мають нормальний закон розподілу, результуюча похибка буде мати той самий нормальний закон розподілу. Тому інтервал довіри сумарної похибки з імовірною довірою P може бути знайдений як:

$$\delta_{\Sigma} = \pm z_p \sigma_{\Sigma} \quad (3.4)$$

де \pm - границя інтервалу довіри сумарної похибки.

З врахуванням (3.2) (3.3) вираз (3.4) матиме вигляд:

а) для корельованих складових:

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sum \pm \delta_{im} \quad (3.5)$$

б) для незалежних складових:

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\sum \delta_{im}^2} \quad (3.6)$$

Якщо у виразі (3.6) всі складові мають позитивну кореляцію, тоді

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\delta_{im}} \quad (3.7)$$

Сумування похибок по виразу (3.6) називається арифметичним сумуванням, а по виразу (3.7) – геометричним сумуванням.

Дійсні значення коефіцієнтів кореляції по абсолютному значенню можуть знаходитись в межах від 0 до 1, тому арифметичне сумування звичайно дає зависокі значення похибки.

Сумування випадкових похибок при їх законах розподілу, які відрізняються від нормальних.

Важкість знаходження сумарної похибки, у цьому випадку, полягає у тому, що закон розподілу сумарної похибки залежить від конкретних видів і характеристик законів розподілу сумарних складових. Наприклад, при складанні двох незалежних похибок, які мають рівномірні закони розподілу з однаковими дисперсіями, результуюча похибка буде розподілятися по трикутному закону. Якщо ці рівномірні закони мають різні дисперсії, тоді результативний закон буде мати вид у вигляді трапеції. Тому для встановлення інтервалу довіри сумарної похибки необхідно у кожному конкретному випадку шукати методами теорії імовірності результуючий закон розподілу за відомими законами сумування складових.

Можливі приблизні способи визначення інтервалу довіри похибки без встановлення результативного закону розподілу. Перший базується на центральній граничній теоремі: якщо число сумуючих незалежних складових достатньо велике, тоді результуючий закон розподілу близький до нормального і в якості коефіцієнту $k_{\square}^{(p)}$ можна приймати z_p . Другий – при сумуванні незалежних складових, які мають закон розподілу.

Розподіл похибок ЗВ на основі центральної граничної теореми теорії імовірності має бути завжди близьким до нормативного розподілу. Але більш детальні дослідження фактичного розподілу похибок ЗВ показали, що закони розподілу похибок різноманітні. Це різко ускладнює призначення верхньої і нижньої границі лінії похибки, а тому і всю методику створення суджень про

положення лінії похибки ЗВ в границях нормуючих границь і умов виходу частини смуги похибки за нормуючі границі.

Методика визначення похибок ускладнюється ще тим, що форма закону розподілу у поперечному перерізі смуги різна не тільки для ЗВ різних типів, але може суттєво відхилитися у окремих видах ЗВ одного і того самого типу. І більше того, навіть у даному виді ЗВ вона може змінюватися по довжині смуги похибки, тобто мати одну форму при $x=0$ і поступово набирати зовсім іншу форму до кінця смуги.

Більш детальним випробуванням цієї властивості граничних квантилів при $P_d=0,9$ встановлено, що інтегральні криві багатьох класів симетричних, високоентропійних розподілів в області 0,05 і 0,95 квантилів перетинаються між собою хоч і не строго в одній точці, зате у дуже вузькому інтервалі. Тому з похибкою в 0,05%, що є у більшості технічних розрахунків, похибка з імовірністю $P_d=0,9$ може бути визначена як $\Delta_{0,9}=1,6\Delta$, а верхні і нижні границі можна знайти за відповідними формулами.

Таким чином, при використанні для оцінки випадкової складової похибки з $P_d=0,9$ оцінки $\Delta_{0,9}=1,6\Delta$ довірча імовірність виходу похибки за симетричні границі буде мати значення $P_d=0,95$, так як вихід за нижню границю буде практично відсутній.

$$\delta_z = \frac{\Delta_\Sigma}{U_{\text{вих}}} \quad (3.8)$$

$$\Delta_\Sigma = Z \cdot \sigma_\Sigma, \quad (3.9)$$

де σ_Σ - сумарне середньо квадратичне відхилення (СКВ) похибок;

$U_{\text{вих}}$ – номінальне значення вихідної напруги;

Z - коефіцієнт Ст'юдента (коефіцієнт довіри), який по нормальному закону розподілу рівний $Z=1,96$.

Звідки:

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum \sigma_i^2}, \quad (3.10)$$

де σ_i - СКВ похибок окремих елементів і яке рівне:

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{Z}, \quad (3.11)$$

де

$$\Delta_i = \delta_i \cdot U_n \quad (3.12)$$

Розрахуємо сумарну похибку розробленої ІВС для визначення місця пошкодження підземних кабельних мереж в цілому. Вхідною інформацією при розрахунку сумарної похибки ІВС є похибка кожного функціонального блоку, з якої він складається.

Наведемо значення похибок кожного функціонального вузла системи:

1. $\delta_{ma} = 0,2\%$ - похибка яку вносить магнітна антена.
2. $\delta_{сф1,2} = 0,8\%$ - похибка яку вносять смугозагороджувальні фільтри.
3. $\delta_{n1} = 0,15\%$ - похибка яку вносить попередній підсилювач 1.
4. $\delta_{кп} = 0,3\%$ - похибка яку вносить керований підсилювач.
5. $\delta_{снф} = 0,4\%$ - похибка яку вносить смугопропускаючий фільтр.
6. $\delta_{рф} = 0,28\%$ - похибка яку вносить резонансний фільтр.
7. $\delta_{n2} = 0,15\%$ - похибка яку вносить попередній підсилювач 2.
8. $\delta_{вн} = 0,55\%$ - похибка яку вносить вимірювальний випростовувач.
9. $\delta_{ni} = 0,3\%$ - похибка яку вносить пристрій індикації.

Знайдемо СКВ кожного блоку ІВС згідно виразу (3.11):

$$\sigma_1 = \frac{0,2}{1,96} = 0,1, \quad \sigma_2 = \frac{0,8}{1,96} = 0,41, \quad \sigma_3 = \frac{0,15}{1,96} = 0,076,$$

$$\sigma_4 = \frac{0,3}{1,96} = 0,15, \quad \sigma_5 = \frac{0,4}{1,96} = 0,2, \quad \sigma_6 = \frac{0,28}{1,96} = 0,14$$

$$\sigma_7 = \frac{0,15}{1,96} = 0,076, \quad \sigma_8 = \frac{0,55}{1,96} = 0,28, \quad \sigma_9 = \frac{0,3}{1,96} = 0,15$$

Знаючи похибку кожного блоку, знайдемо СКВ похибок згідно виразу (3.10):

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{0,1^2 + 0,41^2 + 0,076^2 + 0,15^2 + 0,2^2 + 0,14^2 + 0,076^2 + 0,28^2 + 0,15^2} = 0,61$$

Знайшовши СКВ, знайдемо сумарну відносну похибку локатора за формулами (3.10), (3.11):

$$\square_{\Sigma} = 0,61 \cdot 1,96 = 1,196$$

гідно формули (3.12), прийнявши, що вихідна напруга вимірювального каналу становить – 50 мВ, знайдемо:

$$\delta_{\Sigma P} = \frac{1,196}{50} = 0,024$$

Отже, сумарна похибка проектованої ІВС для визначення місця пошкодження підземних кабельних мереж становить 2,4%, що є достатнім для визначення координат підземних силових кабельних ліній з необхідною для практики точністю.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Яцук В.О., Ванько В.М., Бойко Т.Г.;
Метрологія та вимірювальна техніка : Підручник / Є.С. Поліщука. – Львів:
Видавництво «Бескид Біт», 2003.-544 с.
2. Поліщук Є.С. Методи та засоби вимірювань неелектричних величин:
Підручник.- Видавництво Державного університету «Львівська політехніка»,
200.- 360 с.
4. Чинков В.М. Основи метрології та вимірювальної техніки.:
Навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 460с.
5. Чинков В.М. Основи теорії похибок засобів вимірювальної техніки.:
Навчальний посібник – Харків: НТУ «ХПІ», 2008. – 88с. 52.
6. Основи метрології та вимірювань / Д.Б. Головка, К.Г. Реґо, Ю.О.
Скрипник.- К.: Либідь, 2001.-408 с.
7. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань.
Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.- Івано-
Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.
8. Тахометр [Електронний ресурс]. – 2008. – Режим доступу до ресурсу:
<https://cxem.net/avto/electronics/4-15.php>
9. Піндус Н.М. Метрологія,технологічні вимірювання та прилади
[Електронний ресурс]. Режим доступу:
<https://dn.nung.edu.ua/course/view.php?id=366>
10. Чеховський С.А., Середюк О.Є., Петришин І.С.,Піндус
Н.М.,Ващишак С.П.,Витвицька Л.А.,Кононенко М.А., Романів В.М. Метрологія
і технологічні вимірювану внафтогазовій промисловості. Навч. посібник
Факел, 2010, с. 500.
11. Піндус Н.М.,. Технологічні вимірювання і прилади: конспект лекцій.
– Івано-Франківськ ІФНТУНГ, 2005.- 258 с

12. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.- Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с. Кісіль І. С. Метрологія, точність і надійність засобів вимірювань. Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів.- Івано-Франківськ: Факел, 2002. – 400 с.