

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Синьківський Віктор Андрійович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Обґрунтування пропозицій та удосконалення технічних засобів локаційного зондування для діагностування технічного стану розподільчих мереж ЛЕП
(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Синьківський В. А.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Ярош Ярослав Дмитрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

д.т.н., професор кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2023

АНОТАЦІЯ

Синьківський В. А. Обґрунтування пропозицій та удосконалення технічних засобів локаційного зондування для діагностування технічного стану розподільчих мереж ЛЕП. Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2023.

Основною метою кваліфікаційної роботи є дослідження та обґрунтування рефлектометра з покращеними метрологічними характеристиками, який може використовувати автоматичну корекцію методичних похибок, обумовлених впливом зовнішніх факторів.

Предметом дослідження є вимірювальні засоби для визначення виду та місць аварійних режимів повітряних ліній електропередачі

Ключові слова: рефлектометр, розподільча мережа, пошкодження.

ABSTRACT

Synkivskiy V. A. Justification of proposals and improvement of technical means of location sensing for diagnosing the technical condition of power transmission networks. Qualification work for obtaining a master's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2023.

The main goal of the qualification work is the research and substantiation of a reflectometer with improved metrological characteristics, which can use automatic correction of methodical errors due to the influence of external factors.

The subject of the study is measuring tools for determining the type and locations of emergency modes of overhead power lines

Key words: reflectometer, distribution network, damage.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	6
1.1 Загальні відомості про методи визначення місць аварій	6
1.2 Дистанційні методи діагностики	7
1.2.1 Фізичні основи дистанційних методів	7
1.2.2 Високочастотні дистанційні методи	11
1.2.3 Низькочастотні дистанційні методи	15
1.3 Топографічні методи діагностики	16
1.3.1 Індукційний метод виявлення аварій	18
1.3.2 Інтелектуальний датчик DiLinSensor	20
Висновки по розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ	25
2.1 Моделювання швидкості переміщення імпульсу гармонійної складової	25
2.2 Моделювання згасання гармонійних складових	32
Висновки по розділу 2	37
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ІМПУЛЬСУ СПЕКТРАЛЬНИМ МЕТОДОМ	38
Висновки по розділу 3	43
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	45
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетичну систему України характеризує високий рівень морального та фізичного зносу, високі втрати (10...15 %) та знижений рівень надійності. Тому питання щодо підвищення надійності її функціонування є дуже актуальним.

З статистики надійності енергосистем слідує, що самими ненадійними елементами енергосистем є повітряні лінії електропередачі (ПЛЕП), при цьому низька надійність високовольтних ліній електропередачі пояснюється частими uszkodженнями проводів, що спричинено як природними, так і штучними причинами. Вимкнення електроенергії є дуже небезпечним фактором, тому оперативне виявлення місця пошкодження ПЛЕП та його усунення дозволяє підвищити надійність ліній. Часто ліквідація аварійних режимів утруднена через великої протяжності ПЛЕП та бездоріжжя, особливо в осіннє та зимове час. Таким чином, розробка методів і коштів виявлення uszkodжень ПЛЕП є дуже актуальним завданням.

В даний час у багатьох країнах світу ведуться роботи з впровадження інтелектуальних електричних мереж (Smart Grid). Інтелектуальні мережі (ІМ) це комплекс технічних засобів, які в автоматичному режимі виявляють найбільше слабкі та аварійно небезпечні ділянки мережі, а потім змінюють характеристики та схему мережі з метою запобігання аварії і зниження втрат. З перерахованих вище визначень і розв'язуваних завдань слід, що основним технічним засобом інтелектуальних мереж є інформаційно - вимірювальні системи (ІВС), які здійснюють контроль, управління і рішення завдань штучного інтелекту.

Найбільше поширення отримали рефлектометри - прилади, засновані на локації зондуючого імпульсу по контрольованому ділянці лінії і на вимірі часу затримки відбитого від місця аварії імпульсу t . Рефлектометри мають простий принцип роботи.

На сьогоднішній день розроблено досить велике кількість методів та

засобів визначення місць ушкодження, що ґрунтуються на принципах локації лінії. Координата аварії визначається за часом проходження імпульсу від джерела до місця аварії та повернення до приймача. Ці прилади відрізняються простотою та мінімальним часом контролю, і з цієї причини досі випускається велике кількість таких приладів. Однак по точності визначення координат аварії ці прилади не задовольняють заданим вимогам, зокрема, похибка може досягати порівняно великих значень. Це з тим, що прилади нормуються по інструментальним похибок, де не враховується методична складова.

Об'єктом дослідження є повітряні ЛЕП 6 - 110 кВ і системи визначення місць ушкоджень повітряних ліній електропередач.

Предметом дослідження є вимірювальні засоби для визначення виду та місць аварійних режимів повітряних ліній електропередачі (ПЛЕП).

Мета роботи – дослідження та обґрунтування рефлектометра з покращеними метрологічними характеристиками, який може використовувати автоматичну корекцію методичних похибок, обумовлених впливом зовнішніх факторів.

Перелік публікацій автора за темою дослідження :

Гончаренко Ю. П., Прядко В. А., Полещук І. І., Синьківський В. А., Остра Н. В. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ВИДУ ЗОНДУЮЧОГО СИГНАЛУ ЗАСОБІВ ЛОКАЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ.// Вісник Хмельницького національного університету /серія: Технічні науки №1, 2022 С.305-312

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

1.1 Загальні відомості про методи визначення місць аварій

У даний час для визначення місць ушкодження повітряних і кабельних ліній електропередачі в Україні та за кордоном розроблено велике кількість приладів, заснованих на різних фізичних принципах дії. При виборі приладу для конкретного завдання необхідний аналіз потенційних можливостей цих приладів. Тому необхідний аналіз методів і засобів визначення виду і місць аварії по деяким класифікаційним ознакам.

Сьогодні відомо велика кількість різних методів ЗМП. Як видно із рис. 1.1 залежно від організації контролю аварійних режимів дані методи поділяються на дистанційні та топографічні[1,2,5].

У дистанційних методах використовуються фізичні принципи, які засновані на зміні параметрів фізичних величин на одному кінці лінії, спричиненому аварійними режимами на ділянці лінії. Дистанційні методи ЗМП також класифікуються по використовуваним моделям електричних ланцюгів: ланцюги з розподіленими параметрами і ланцюги з зосередженими параметрами. на практиці ці методи відповідно називаються високочастотними та низькочастотними. Низькочастотні методи використовують частоти від нуля до кількох кілогерців, а як моделі використовуються рівняння ланцюгів змінного струму, складені по законам Кірхгофа. Високочастотні - десятки кілогерц, а в якості моделей використовуються рівняння у приватних похідних, які на практиці часто замінюються спрощеними схемами заміщення.

При топографічних методах місце ушкодження визначається візуально або за допомогою електромагнітних пристроїв безпосередньо при переміщенні ремонтної бригади по трасі вздовж лінії. Переміщення пошукової бригади по трасі може здійснюватися за допомогою різних

транспортних коштів: автомобілів, вертольотів, дирижаблів. Необхідно відзначити, що в останній час для рішення цих завдань пропонується використовувати безпілотні літальні апарати, які вже використовуються при контролі нафто- та газопроводів.

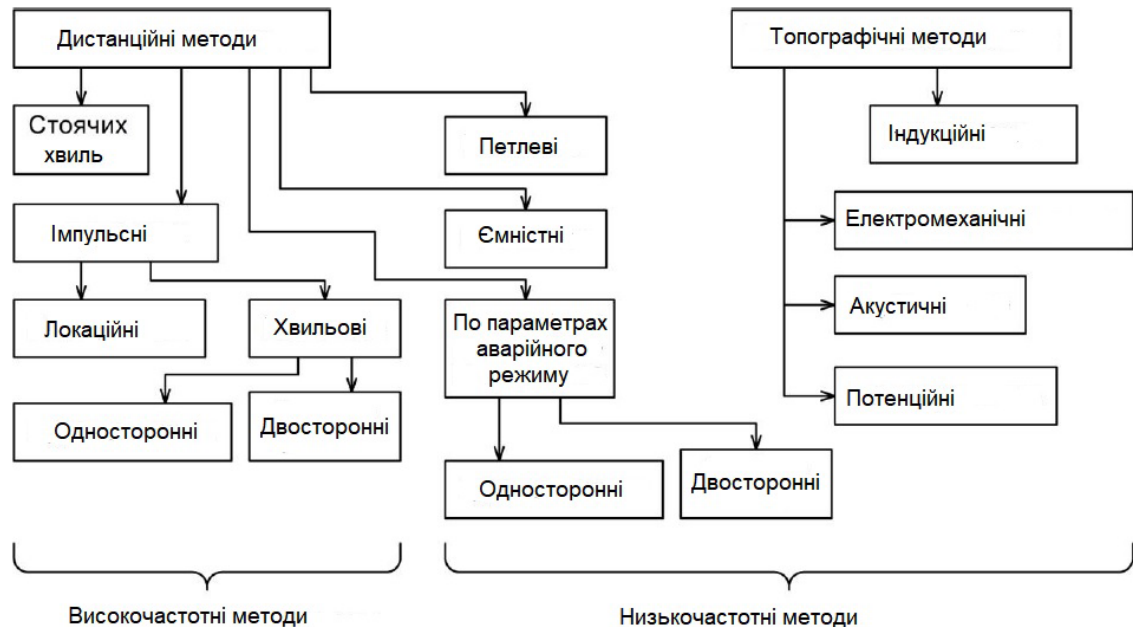


Рисунок 1.1 - Загальна класифікація методів ВМП

1.2 Дистанційні методи діагностики

1.2.1 Фізичні основи дистанційних методів

При аналізі дистанційних методів ВМП і їх потенційних можливостей необхідна інформація про фізичні принципи дії, на яких засновані дані методи. Більшість дистанційних методів використовують математичні моделі ліній із розподіленими параметрами. Нормальні і перехідні режими ліній електропередач характеризуються особливостями, які обумовлені хвильовим характером розподілу електромагнітної енергії і співвідношенням питомих параметрів лінії [1].

Одним із засобів, що спрощують уявлення про процеси, що протікають у енергетичної системи є схеми заміщення лінії електропередачі. У залежності від необхідної точності ці моделі видаються в вигляді різних електричних схем, які значно спрощують завдання і вносять похибка в модель засобів

контролю. Спрощення схеми може привести до невірних висновків про аварійні режими. Тому для проведення аналізу необхідні основні відомості про лінії з розподіленими параметрами.

До первинних параметрів одиниці довжини двопровідної лінії відносяться: C_0 - поперечна ємність між прямими і зворотними проводами, L_0 – індуктивність петлі, утвореної прямими зворотними проводами, R_0 - поздовжній активний опір прямого і зворотного проводів, G_0 - поперечна активна провідність витoku ізоляції між прямим і зворотним проводами. Для розрахунку цих параметрів необхідні вихідні дані: номінальна напруга лінії, кількість ланцюгів лінії, марка і переріз проводу, розташування проводів на опорі і відстань між проводами.

До вторинних параметрів в операторній формі запису відносяться хвильове опір [2]:

$$Z_B = \sqrt{\frac{R_0 + pL_0}{G_0 + pG_0}}, \quad (1.1)$$

і коефіцієнт поширення [11]:

$$\gamma(p) = \sqrt{(R_0 + pL_0)(G_0 + pG_0)}. \quad (1.2)$$

Найбільш поширена схема заміщення нескінченно малого елемента двопровідної лінії показано на рис. 1.2 [11].

Розіб'ємо лінію на ділянки довжиною dx (рис. 1.2), де x - відстань, що відраховується від початку лінії. На довжині dx активний опір дорівнює $R_0 dx$, індуктивність - $L_0 dx$, провідність витoku - $G_0 dx$ і ємність - $C_0 dx$.

Позначимо струм на початку розглянутої ділянки лінії через i і напругу між проводами лінії на початку ділянки u . І струм, і напруга є в загальному випадку функціями відстані вздовж лінії x та часу t . Тому надалі в рівняннях використані часткові похідні від u від i по часу t і по відстані x .

Якщо для деякого моменту часу t струм на початку розглянутої ділянки дорівнює i , то в результаті витoku через поперечний елемент струм в кінці

$$i + \frac{di}{dx} \cdot dx, \text{ де } \frac{di}{dx} - \text{ швидкість}$$

зміни струму в напрямку x . Швидкість, помножена на відстань dx , є збільшенням струму на шляхи dx .

Аналогічно, якщо напруга в початку ділянки u , то в кінці ділянки для того ж моменту часу значення напруги дорівнює

$$0 = -u + R_0 dx i + L_0 dx \frac{di}{dt} + u + \frac{du}{dx} dx$$

Після спрощення та ділення рівняння на dx одержимо

$$-\frac{du}{dx} L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i \quad (1.3)$$

По першому закону Кірхгофа,

$$i = di + i + \frac{di}{dx} dx \quad (1.4)$$

Струм di дорівнює сумі струмів, що проходять через провідність $G_0 dx$ і через ємність $C_0 dx$:

$$di = \left(u + \frac{du}{dx} dx \right) G_0 dx + \frac{d}{dt} C_0 dx \left(u + \frac{du}{dx} dx \right).$$

Нехтуємо доданками другого порядку малості, тоді

$$di = u G_0 dx + C_0 dx \frac{du}{dt} \quad (1.5)$$

Підставимо (1.4) в (1.5), спростимо і поділимо рівняння на dx :

$$-\frac{di}{dx} = G_0 u + C_0 \frac{du}{dt} \quad (1.6)$$

Рівняння (1.3) і (1.6) є основними диференціальними рівняннями для лінії з розподіленими параметрами.

Аналіз усталених і перехідних режимів у однорідних довгих лініях заснований на розв'язанні диференціальних рівнянь (1.5 та 1.6) у часних похідних, отриманих за допомогою законів Кірхгофа для елемента лінії довжиною dx (рис. 1.2) [4]:

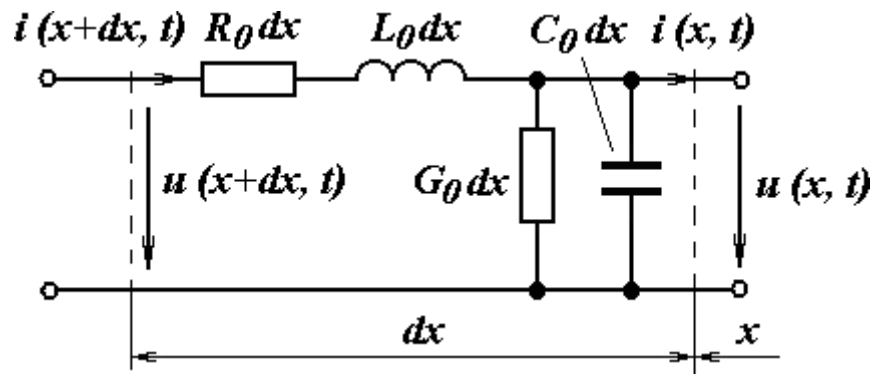


Рисунок 1.2 - Схема заміщення елементарного ділянки лінії

Рівняння (1.3 і 1.6) аналітично можуть бути вирішені тільки для часного випадку, а саме для гармонійних впливів. При більш складних, у тому числі і ступінчастих впливах використовуються чисельні методи розрахунку та розроблені на їх основі програми.

При синусоїдальній напрузі джерела живлення однорідній лінії та постійних параметрах рівняння (1.3 та 1.6) записуються в комплексній формі [4]:

$$d\dot{U}/dx = (R_0 + j\omega L_0)\dot{I} = Z_0\dot{I}, \quad (1.7, a)$$

$$d\dot{I}/dx = (G_0 + j\omega C_0)\dot{U} = Y_0\dot{U}, \quad (1.7, б)$$

де $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$, Ом/м, $G_0 + j\omega C_0 = Y_0$, - комплексні подовжні і поперечні параметри лінії на одиницю довжини.

Загальне рішення рівнянь (1.7) представляє собою суму прямих і зворотних біжучих хвиль з напругою і струмом [11]:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x}, \quad (1.8, a)$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{A}_2}{Z_B} e^{-\gamma x} - \frac{\dot{A}_1}{Z_B} e^{\gamma x}, \quad (1.8, б)$$

де \dot{A}_1 і \dot{A}_2 - постійні інтегрування;

Z_B - хвильовий опір, Ом.

Постійні інтегрування в (1.8) визначаються з використанням

граничних значень струму та напруги.

Для гармонійних сигналів вираз для коефіцієнта поширення (1.2) має наступний вигляд [1]:

$$\gamma = \alpha + j\beta,$$

де α - коефіцієнт загасання, що характеризує загасання падаючої хвилі на одиницю довжини лінії (на 1 км);

β - коефіцієнт фази, характеризує зміна фази падаючої хвилі на одиницю довжини лінії (на 1 км або м).

Відношення напруги відбитої хвилі в кінці лінії до напруги падаючої хвилі в кінці лінії є коефіцієнт відображення за напругою [11]:

$$K_u = \frac{\dot{A}_1 e^{\gamma l}}{\dot{A}_2 e^{-\gamma l}} = \frac{Z_H - Z_B}{Z_H + Z_B},$$

де Z_H - - опір навантаження, Ом;

l - Довжина лінії, км.

При узгодженому навантаженні $K_u = 0$, при холостому ході $K_u = 1$.

Коефіцієнт відображення по струму $K_i = K_u$.

Фазова швидкість хвилі [2]:

$$v_\phi = \omega / \beta . \quad (1.11)$$

У практиці інженерних розрахунків кожна фаза лінії електропередач видаються у вигляді чотириполюсника, який у свою чергу замінюється простий схемою електричної ланцюги з зосередженими параметрами. Слід зазначити, що подання лінії спрощеними схемами заміщення дозволяє враховувати спотворення форми вхідного впливу, але при цьому не враховується затримка сигналу в часі.

1.2.2 Високочастотні дистанційні методи

Метод стоячих хвиль заснований на вимірі повного вхідного опору пошкодженої лінії у широкому діапазоні частот. Відомо, що відстань між

резонансними частотами (максимумами та мінімумами вхідного опору) залежить від відстані до місця КЗ або обриву [1].

Локаційний метод заснований на вимірі часу між моментом посилки в лінію зондувального електричного імпульсу та моментом приходу на початок лінії імпульсу, відбитого від місця ушкодження. За цей час t імпульс проходить шлях, що дорівнює подвійній відстані до місця ушкодження $l = t \cdot v / 2$, де v - швидкість поширення зондуючого імпульсу (рис. 1.3). Поширення сигналу лінією – складний процес, залежить від числа, взаємного розташування, матеріалу і розміру проводів і тросів, їх віддаленості від поверхні землі, від її електропровідності. Швидкість переміщення хвилі (фазова швидкість) в лінії без втрат, розміщення в вакуумі і над ідеально провідною поверхнею дорівнює швидкості світла (300 м/мкс). У реальній повітряній лінії хвиля переміщається по петлі фаза-земля зі швидкістю $v = 275$ м/мкс і по петлі фаза-фаза зі швидкістю $v = 296$ м/мкс. У кабельної лінії швидкість поширення хвилі значно нижче - 160 м/мкс і приблизно однакова для будь-якої петлі.

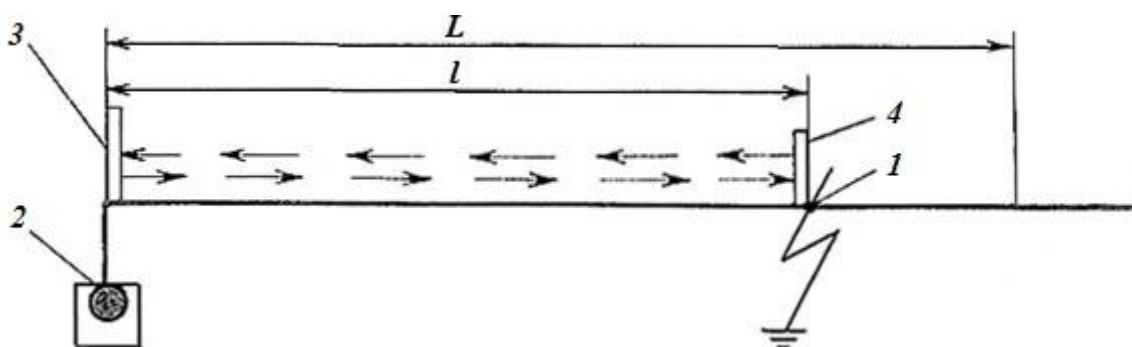


Рисунок 1.3 – Схема проходження височастотного імпульсу при локаційному методі ЗМП: 1 - місце пошкодження, 2 - локаційний шукач, 3 - зондуючий імпульс, 4 - відбитий імпульс, L - Загальна довжина лінії, l - відстань до місця ушкодження

У якості локаційних шукачів рис. 1.3) для знаходження місця аварії використовуються рефлектометри Зовнішній вигляд цих приладів зображено на рис. 1.4 [2].

Безперечним перевагою рефлектометрів є порівняльна простота монтажу (підключення до лінії), проте ефективність локаційного методу ВМП знижується через складності реєстрації відбитого сигналу, котрий може відбиватися не тільки від місця аварії, але і від інших неоднорідностей лінії. Таким чином, рефлектометри реалізують непрямий метод вимірювання, на точність якого здійснюють негативне вплив різні зовнішні чинники. Крім того, відбитий сигнал завжди ослаблений та спотворений, що є джерелом додаткової похибки вимірювання [7].



Рисунок 1.4 - Сучасні прилади імпульсної рефлектометрії

Хвильові методи визначають моменти приходу на підстанцію виникаючих в місці ушкодження лінії електромагнітних хвиль (хвиль розряду замкнутої на землю фази). Цей метод відрізняється від локаційного тим, що джерелом інформаційного сигналу є аварійна ділянка лінії. Форма сигналу, що виникає в місці короткого замикання або обриву, може мати складну форму, що негативно впливає на точність визначення часу надходження сигналу. Наведені нижче методи відрізняються методиками реєстрації часу приходу сигналу.

Хвильовий метод двосторонніх вимірів ґрунтується на вимірі часу між моментами досягнення двох кінців лінії фронтами електромагнітних хвиль, що виникають у місці ушкодження. Необхідною умовою реалізації методом є синхронізований рахунок часу на двох кінцях з високою точністю (до

мікросекунд).

На сьогоднішній день для реалізації даного методу використовуються прилади *TWS* (або *DSFL*) компанії *Qualitrol* (Рис. 1.5, 1.6) [7], встановлювані на обох кінцях лінії, а синхронізація часу виконується на основі сигналів навігаційних супутників ГЛОНАСС або *GPS*.

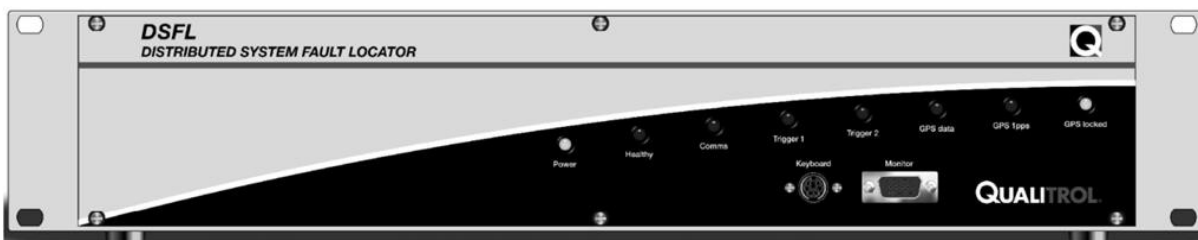


Рисунок 1.5 - Прилад DSFL МКІІІ для виконання ВМП хвильовим методом

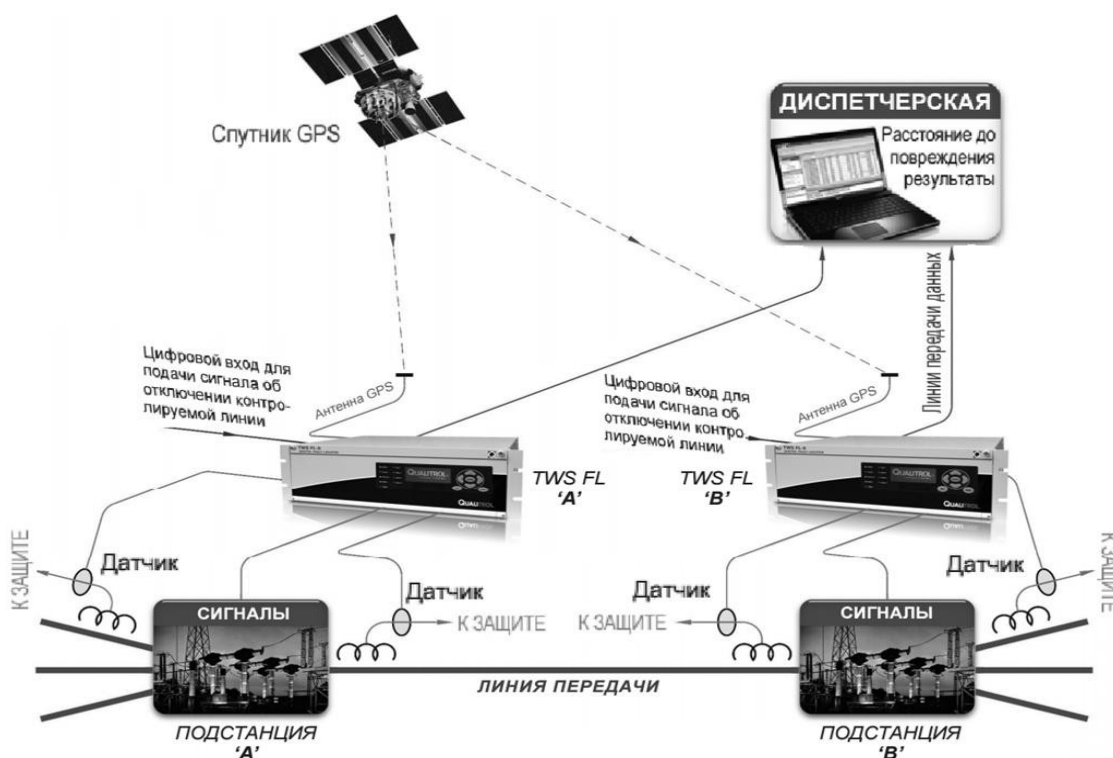


Рисунок 1.6 - Схема реалізації ЗМП хвильовим методом

Хвильовий метод односторонніх вимірювань заснований на вимірі часу між приходами хвиль першого і другого відбиття від місця пошкодження, або різниця часів приходу хвиль каналом фаза-фаза і по каналу фаза-земля.

Загальним недоліком хвильових методів є дорожнеча і складність реалізації [2].

1.2.3 Низькочастотні дистанційні методи

Петльовий метод заснований на вимірі опору постійному струму жив кабелю, відключеного через пробою фази на землю. Перехідне опір у місці пошкодження попередньо зменшується за допомогою операції пропалювання ізоляції від спеціального джерела струму. Для вимірювання використовується бруківка схема, плечима якої є опори жил, де в одну діагональ мосту увімкнено вимірювальний прилад (для контролю умов рівноваги), а в іншу джерело живлення та перехідний опір. За виміряним опорам опосередковано визначається відстань від місця контролю до місця пробою.

Фіксуючі омметри. Фіксуючі омметри забезпечують вимірювання та тривале зберігання значень опору петлі КЗ при всіх міжфазних ушкодженнях в мережі. По питомому опору лінії шкала приладу градується безпосередньо в кілометрах. Для виключення впливу на результат вимірювання відстані перехідного опору $R_{\text{пер}}$ в місці КЗ, яке зазвичай має чисто активний характер, фіксуючі омметри вимірюють не повний опір петлі КЗ ($Z_{\text{кз}}$), а тільки його індуктивну складову $X_{\text{кз}}$. Значення $Z_{\text{кз}}$ визначається активним опором ділянки лінії до місця КЗ ($R_{\text{кз}}$), перехідним опором у місці КЗ ($R_{\text{пер}}$) та індуктивним опором ділянки лінії $X_{\text{кз}}$ до місця КЗ. Основними недоліками вимірювальних приладів фіксації опору є:

- похибки ВМП від струмів і навантажень, підключених в наприкінці, а також на відгалуженнях пошкодженої ПЛ;

- значне збільшення кількості підведених до фіксатору вхідних величин: два (три) фазних струму і три фазні напруги;

- складність фіксаторів опору в порівнянні з фіксаторами струмів та напруг зворотної послідовності.

Ємнісний метод заснований на вимірі ємності жили кабелю від місця

контролю до місця обриву. По вимірній ємності опосередковано визначається відстань від місця контролю до місця пробою.

Метод ЗМП за параметрами аварійного режиму. Цей метод заснований на вимірі струмів і напруг зворотної послідовності. Фіксація струмів та напруг зворотної послідовності здійснюється за допомогою спеціальних приладів, які вимірюють і запам'ятовують значення струмів і напруг зворотній послідовності в режимі замикання двох фаз.



Рисунок 1.7 - Прилади для реєстрації ВМП по параметрам аварійного режиму

На основі більш глибокого аналізу розроблено детальну класифікацію дистанційних методів ВМП, яка наведена в таблиці 1.1.

З проведеного спільного аналізу методів слід, що найбільшому спотворенню піддається інформаційний сигнал (функція Хевісайда) в хвильовому метод, а найменшому - в методі стоячих хвиль. Тому потенційна точність методу стоячих хвиль вище, чим інших методів [3].

1.3 Топографічні методи діагностики

На основі принципу визначення місць ушкодження топографічні методи поділяють такі методи (див. рис. 1.1): індукційний метод, акустичні методи, потенційні і електромеханічні методи.

Таблиця 1.1

Класифікаційні ознаки	Дистанційні методи					
	Високочастотні методи			Низькочастотні методи		
Частотні діапазони	Рівняння в часткових похідних (електричні ланцюги з розподіленими параметрами)					
Математичні моделі	Алгебраїчні рівняння по законам Кірхгофа (електричні ланцюги змінного струму)					
Форма обурюючого впливу	Гармонічний сигнал	Послідовність прямокутних імпульсів	Ступінчастий вплив (функція Хевісайда)	Постійний сигнал	Гармонічний сигнал	Гармонічний сигнал
Джерело збурюючої дії	Зовнішнє джерело (Метод стоячих хвиль)	Зовнішнє джерело (Локаційний метод)	Внутрішнє джерело – енергія електромагнітного поля у точці аварійної комутації (Хвильовий метод)	Зовнішнє джерело (Петльовий метод)	Зовнішнє джерело (Ємнісний метод)	Внутрішнє джерело – комутація електричної лінії (Метод ВМП за параметрами аварійного режиму)
Методи реєстрації часу приходу сигналу	Односторонній	Односторонній	Двосторонній Односторонній	Односторонній	Односторонній	Двосторонній Односторонній
Вплив зовнішніх факторів на точність ВМП	Значний	Значний	Значний	Незначний	Незначний	Значний
Перешкодостійкість	Висока	Низька	Низька	Висока	Висока	Низька
Ступінь спотворення форми реєстрованого сигналу	невисока	середня	висока	невисока	невисока	невисока
Необхідність виконання обчислювальних операцій	ні	ні	так	так	ні	так

Усе відомі топографічні методи відносяться до низькочастотним. Найбільш поширеним і важливим з них є індукційний, використовується на КЛ та ПЛ, а також при визначенні стану внутрішніх проводок.

1.3.1 Індукційний метод виявлення аварій

Прикладом сучасних розробок в області моніторингу повітряних ліній є індикатори короткого замикання (ІКЗ) виробництва Horstmann OPTO F 3.0 [7]. Horstmann OPTO-F 3.0 та Opto F+E 3.0 - індикатори короткого замикання (ІКЗ) призначені для відображення та сигналізації короткого замикання у трифазному кабелі. Модифікація OPTO-F+E 3.0 призначена також для іднікації та сигналізації короткого замикання на землю [7].

ІКЗ призначені для визначення розташування короткого замикання і моніторингу повітряних ліній розподільних мереж напругою 6-35 кВ. Прилади встановлюються на опорах ЛЕП. Залежно від модифікації ІКЗ дозволяють здійснювати візуальний або дистанційний контроль наявності аварійної ситуації. Індикатори короткого замикання реєструють міжфазні замикання і однофазні замикання на землю. Параметри, виміряні індикаторами, передаються по бездротовому каналу зв'язку неліцензованої частоти або *GPRS* -каналу [7]. Користувач має можливість змінювати налаштування виявлення аварійної ситуації. Аварії реєструються в журналі і зберігаються в пам'яті приладу. живлення індикаторів забезпечується від внутрішньої батареї або від контрольованої лінії.

Модифікація Horstmann OPTO F 3.0 (рис. 1.8) дозволяє зчитувати інформацію про аваріях, проводити моніторинг ПЛ, змінювати внутрішні налаштування і параметри спрацьовування безпосередньо на диспетчерському пункті з допомогою *GSM / GPRS* -каналу (рис. 1.9) [7]. Індикатор передає ці дані на сервер, звідки їх переглядає та обробляє диспетчер. Ця модифікація дозволяє інтегрувати дані в систему телемеханіки та АСУ ТП. живлення здійснюється від внутрішньої батареї.



Рисунок 1.8 – Зовнішній вигляд ІКЗ Horstmann OPTO F 3.0

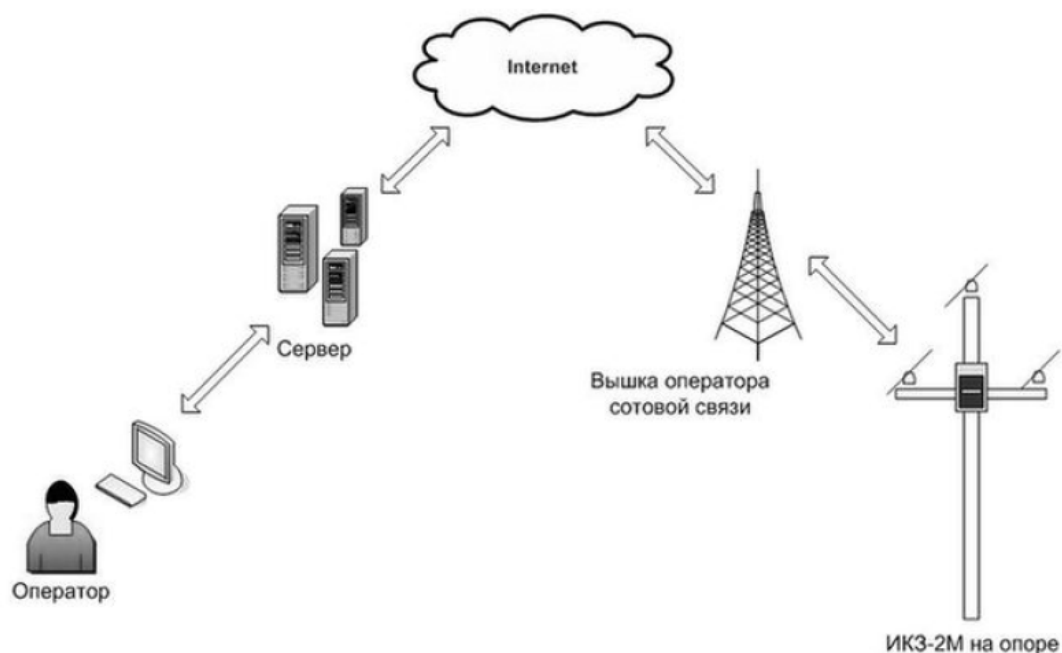


Рисунок 1.9 - Принцип функціонування індикатора короткого замикання

У [12] описується зарубіжна розробка системи визначення виду аварії на ПЛ, що містить датчик струмів трьох фаз (рис. 1.10). Виміряні струми аналізуються і по співвідношенню їх амплітуд і кутів зсуву фаз розпізнаються аварійні режими. Подібні схеми вимірювання використовуються в вітчизняних розробках. Основним недоліком таких схем контролю є те, що встановлення датчиків на малому відстані від проводів не дозволяє здійснювати вимірювання з необхідною точністю через кінцеві розміри датчика. Це пов'язано з тим, що градієнт електричних та магнітних величин

близько проводів максимальний. Тому необхідно дослідження можливостей встановлення датчиків поза зоною проводів, що має спростити монтаж та експлуатацію системи моніторингу.

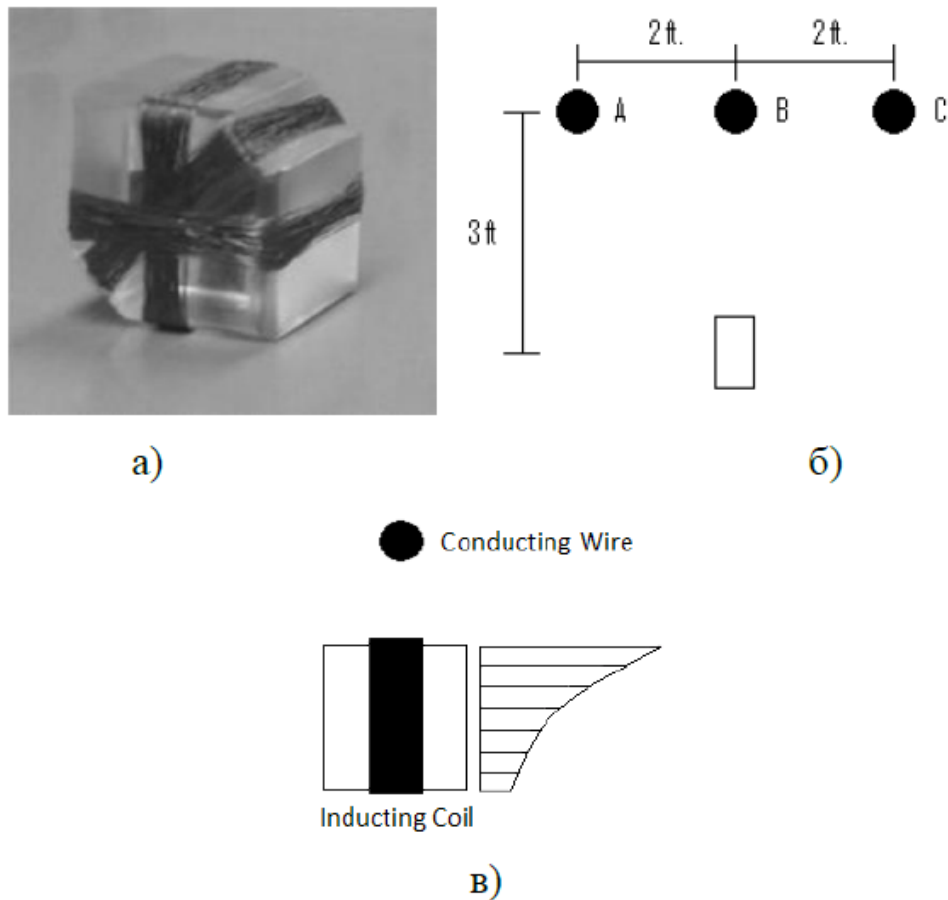


Рисунок 1.10 – Прилад контролю режимів мережі: а) конструкція датчика; б) схема встановлення; в) вплив розмірів датчика на точність контролю

У [13] пропонується новий підхід для ЗМЗ за допомогою використання датчика магнітного поля (рис. 1.11). Більшість аварій в системах електроенергії пов'язані з коротким замиканням. Отже, виявлення аварії може бути виконано шляхом порівняння струмів в нормальних умовах і в аварійних умовах. Вимірювання струмів можна виконати за допомогою вимірювання магнітного поля.

Традиційні вимірювання струму виконуються шляхом розміщення котушки індуктивності (трансформатора струму) навколо дроту (рис. 1.12) [13], тим не менше менше, для повітряних ліній напругою вище 110 кВ це

технічне Рішення неідеально. Уникнення цього нестачі в [13] пропонується виконувати вимірювання струму шляхом безконтактного аналізу магнітного поля (МП), залежить від струму навантаження. Сила, напрямок і розподіл магнітного поля навколо дроти містять інформацію про електричних параметрах, таких як амплітуда, частота і фаза електричного струму. Зазначається, що застосування сучасних магнітних датчиків дозволяє отримати точні та достовірні дані без фізичного контакту з фазними проводами [13].

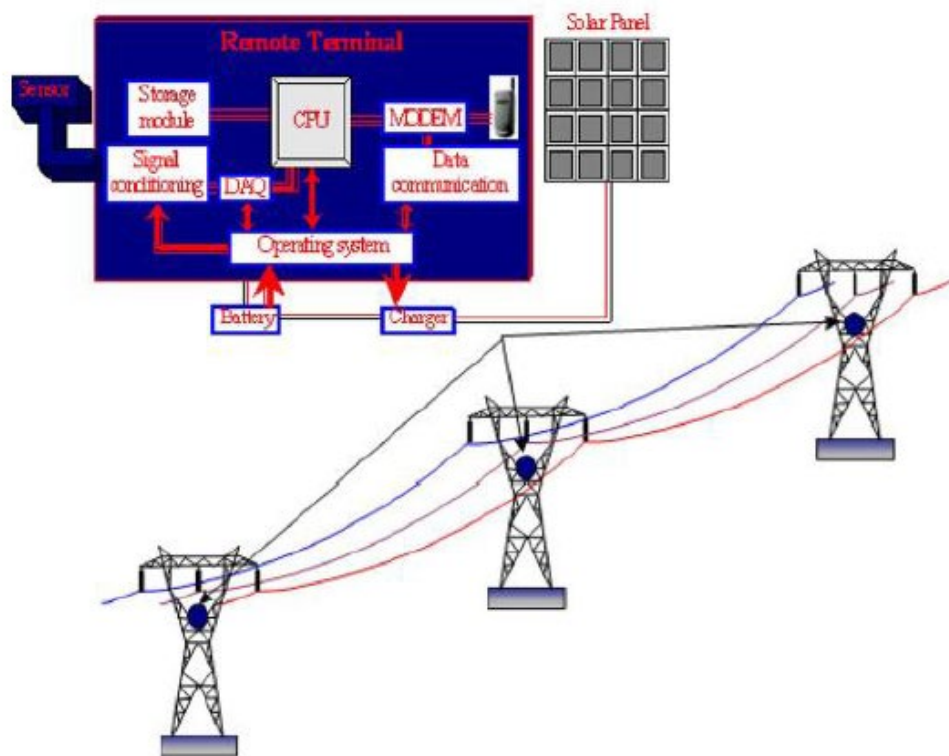


Рисунок 1.11 – Загальна схема здійснення ЗМЗ за допомогою датчиків магнітного пол

Зображена на рис. 1.11 система складається з мікропроцесора (CPU) та периферійних пристроїв (вимірювальний модуль, модуль збору даних (DAQ), модуль зберігання, модуль зв'язку та модуль живлення). Мікропроцесор керує пристроями, а модуль збору даних аналізує безперервний сигнал з чутливого елемент. Сенсор включає в себе датчик МП, який дозволяє вимірювати магнітну індукцію за трьома координатами (x, y, z), а також підсилювач і ланцюг фільтрації. Коли пристрій виявляє зміну

поступаючого сигналу, отримані дані реєструються і відправляються на дистанційний центр моніторингу за допомогою бездротового каналу зв'язку. Живлення всіх модулів здійснюється від акумуляторної батареї, що заряджається від сонячної панелі або пристрою відбору потужності від лінії.

я (коло вказують на позиції датчиків)

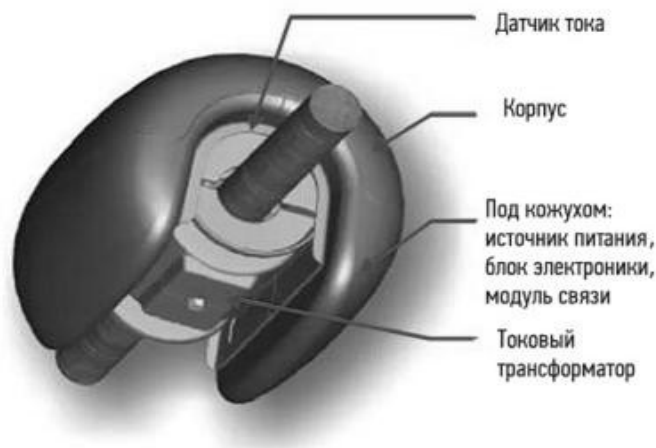


Рисунок 1.12 - Прилад OTLM-system для моніторингу струмовий навантаження ПЛ

У багатьох випадках в якості датчиків магнітного поля застосовуються сенсори на основі магніторезистивного ефекту - магніторезистори (МР) [13], принцип дії яких заснований на зміні електричного опору напівпровідника (або металу) при дії на нього магнітного поля [12]. На сьогоднішній день в промисловості використовуються анізотропні магніторезистори, тунельні магніторезистори, а також гігантські магніторезистори. Ці датчики магнітного поля мають високу чутливість, значний температурний діапазон експлуатації та широкий діапазон робочих частот.

1.3.2 Інтелектуальний датчик *DiLinSensor*

Система моніторингу стану повітряних ліній «*DiLin*» призначена для [8]:
— визначення поточною технологічної здібності лінії забезпечувати підвищену пропускну здатність.

— проведення оперативної оцінки стану підвісної ізоляції ЛЕП, виявлення дефектів, оцінки ступеня розвитку дефектів.

— реєстрації перехідних процесів у лінії з метою точної локації місць виникнення дефектів вздовж лінії. Підготовка конкретних рекомендацій з планування і проведенню ремонтних робіт.

— створення умов для комплексного аналізу роботи шляхів транзиту електричної енергії виходячи з прогнозування зміни технічного стану повітряних ліній.

Система « *DiLin* » складається з трьох основних елементів [8]:

— *DiLin-Sensor* - первинні датчики системи моніторингу, монтуються на дротах контрольованої повітряної лінії. Вся зареєстрована і оброблена датчиками інформація передається в систему по радіоканалу.

— *DiLin-Observer* - локальний центральний модуль системи моніторингу, призначений для збору інформації з первинних датчиків марки *DiLin-Sensor* . Монтується на кожною боці лінії, збирає і передає інформацію комп'ютер системи.

— Комплекс программарку « *DiLin-iNVA* » -математичне забезпечення верхнього рівня, об'єднувальне інформацію від локальних вузлів *DiLin-Observer* , що реалізує комплексні діагностичні функції системи.

При допомозі датчика *DiLin-Sensor* , який монтується на дротах лінії, відбувається реєстрація і аналіз комплексної інформації о технічному стані ЛЕП [8]:

- Температура проводів ЛЕП.
- Величина струму в лінії.
- Механічні 3D коливання проводів.
- Параметри навколишнього повітря - температура і вологість.
- Наявність зледеніння проводів.
- Локація місць виникнення дефектів в лінії.

Датчик *DiLin-Sensor* виготовлений в вигляді циліндра, монтується на дротах ЛЕП, має діаметр 200 мм і довжину 300мм. Модифікація датчика

DiLin-Sensor/G+ з вбудованим імпульсним генератором для контролю зледеніння проводів має збільшену до 400 мм довжину.

Живлення всіх електронних компонентів датчика здійснюється від струму навантаження, що протікає у проводах ЛЕП. Для передачі зареєстрованої інформації «на землю» використовується стандартний радіоканал чи GSM зв'язок. Вбудований в датчик модуль радіозв'язку реалізує протокол *ZigBee*.

Потужність передавача достатня для організації надійною зв'язку з максимальним відстанню між датчиками і базовим приладом *DilinObserver* до 1500 метрів.

Висновки по першому розділу

1. З проведеного аналізу методів і коштів ЗМП ліній електропередачі випливає, що в даний час всі існуючі методи поділяються на дві групи: топографічні і локаційні, які мають переваги і недоліки, а саме, перші більш точні і в теж час складні, а другі простіші, але менш точні. Локаційні прилади підкупають своєю економічністю і простотою монтажу і експлуатації.

2. З аналізу фізичного принципу дії локаційних методів слід, що параметри довгої лінії визначають фазову швидкість переміщення сигналу та відповідно неточність завдання параметрів лінії та швидкості визначає похибка визначення місця аварії.

3. У результаті проведеного аналізу не виявлено джерел по дослідженню точності рефлектометрів та методам її підвищення. Необхідно відзначити, що рефлектометри застосовуються в енергетиці порівняно давно. Тому для аналізу потенційних можливостей рефлектометрів необхідно провести дослідження джерел їх похибок і можливостей їхньої корекції. Вирішення цих завдань дозволить підвищити точність рефлектометрів та відповідно розширити сферу їх застосування, що і є метою справжньої дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РЕФЛЕКТОМЕТРІЇ

2.1 Моделювання швидкості переміщення імпульсу гармонійної складової

Повітряна лінія змінного струму представляє собою лінію з розподіленими параметрами і тому швидкість проходження імпульсу в лінії визначається її параметрами. Як математична модель лінії в практичних розрахунках використовуються електричні схеми заміщення нескінченно малого ділянки лінії [5]. Необхідно відзначити, що схеми заміщення є наближеною моделлю і з цієї причини розроблено кілька варіантів схем заміщення, кожен з яких рекомендований для конкретного об'єкта [10]. Таким чином, використання схем заміщення є джерелом похибки моделювання. При моделюванні повітряних ліній електропередач використовують схема заміщення, наведена на рис. 1.2.

Характеристичними або вторинними параметрами довгої лінії є її коефіцієнти згасання α , фази β і хвильове опір Z_{XB} .

Виразимо характеристичні параметри довгої лінії через первинні параметри.

$$\gamma^2 = (R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0) = (\alpha + j\beta)^2,$$

де γ - коефіцієнт поширення електромагнітної хвилі, ω – кутова частота,

R_0 - питомий опір лінії,

G_0 - питома провідність лінії.

Оскільки для визначення відстані до місця аварії використовується фазова швидкість, то визначимо із цього вираження коефіцієнт фази [6].

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0 + \omega^2 L_0)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}}, \quad (2.2)$$

При частотах більше 1 МГц для більшості конструкції довгих ліній виконуються умови $R_0 \ll \omega L_0$ і $G_0 \ll \omega C_0$. Тому на практиці часто використовується спрощений вираз

$$\beta = \omega \sqrt{L_0 C_0} . \quad (2.3)$$

Фазова швидкість визначається відповідно з допомогою вирази:

$$v_\phi = \omega / \beta . \quad (2.4)$$

З виразу (2.3) випливає, що фазова швидкість залежить від частоти гармонійного сигналу. Зонduючий імпульс має прямокутну форму і становить суму гармонійних складових із частотами від основної гармоніки до безкінечності. Зі спрощеного виразу (2.3) випливає, що тривалість прямокутного імпульсу під час проходження лінією залишається незмінною. Однак із виразу (2.2) випливає, що фазова швидкість залежить від частоти і тому для аналізу впливу параметрів лінії на фазову швидкість необхідно використовувати вираз (2.2). Для визначення функцій впливу виразимо збільшення функції через збільшення параметрів лінії. Використання комп'ютера для визначення приватних похідних не дозволило вирішити цю завдання через значних похибок чисельних методів, реалізованих в програмі комп'ютера.

Щоб усунути похибку чисельного аналізу, перетворюємо формулу коефіцієнта поширення за методикою [6]:

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{(R_0 + j\omega L_0) \cdot (G_0 + j\omega C_0)} = \sqrt{j^2 \omega^2 L_0 C_0 \cdot (1 - j R_0 / \omega L_0) \cdot (1 - j G_0 / \omega C_0)} = \\ &= j\omega \sqrt{L_0 C_0} \cdot (1 - j R_0 / \omega L_0)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 - j G_0 / \omega C_0)^{\frac{1}{2}}. \end{aligned}$$

У цьому виразі два останні множники представляють собою біноми Ньютон. Розкладаючи їх в ряд [6]:

$$\begin{aligned} \gamma(j\omega) &= j\omega \sqrt{L_0 C_0} \cdot \left(1 - j R_0 / 2\omega L_0 + R_0^2 / 8(\omega L_0)^2 - j R_0^3 / 16(\omega L_0)^3 + \dots\right) \times \\ &\times \left(1 - j G_0 / 2\omega C_0 + G_0^2 / 8(\omega C_0)^2 - j G_0^3 / 16(\omega C_0)^3 + \dots\right) \end{aligned}$$

обмежуючись першими двома доданками і нехтуючи рештою як величинами другого і більше високого порядків малості, отримуємо вираз:

$$\begin{aligned} \gamma(j\omega) &= \alpha + j\beta \approx j\omega \sqrt{L_0 C_0} \cdot \left(1 - j R_0 / 2\omega L_0 - G_0^2 / 8(\omega C_0)^2 - j R_0 G_0 / 4\omega^2 L_0 C_0 + \dots\right) \approx \\ &\approx \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} + j\omega \sqrt{L_0 C_0} \end{aligned}$$

У якості прикладу обчислення похибок поставимося значеннями первинних параметрів і їх відхилень (5% від значень параметрів R_0 , L_0 , C_0 і 10% від значення параметра G_0). Виробимо аналіз коефіцієнта фази при 5 частотах, визначимо абсолютну і відносну похибки коефіцієнта фази.

$$R_0 = 14 \text{ Ом}$$

$$\Delta R_0 = 0.7 \text{ Ом } \Delta$$

$$G_0 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ См}$$

$$G_0 = 0.5 \cdot 10^{-6} \text{ Д}$$

$$L_0 = 17.8 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$$

$$\Delta L_0 = 0.89 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$$

$$C_0 = 6.35 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$\Delta C_0 = 0.317 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

Виробимо розрахунок для коефіцієнта фази на різних частотах:

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \\ f_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 50 \\ 1 \cdot 10^3 \\ 1 \cdot 10^6 \\ 4 \cdot 10^8 \\ 8 \cdot 10^8 \end{pmatrix} \text{ Гц.}$$

Коефіцієнт фази для цих частот визначимо по формулою (2.8):

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0 + \omega^2 L_0)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)}}, \quad (2.8)$$

де де $\omega = 2\pi f$.

Оскільки, метод вимірювання, реалізований в рефлектометри є непрямим, то для визначення функції виявлення похибок завдання параметрів лінії на загальну похибку відстані визначимо відхилення коефіцієнта фази через відхилення параметрів R_0 , L_0 , C_0 , G_0 відповідно [3].

$$\Delta\beta \approx \frac{\partial f}{\partial R_0} \cdot \Delta R_0 + \frac{\partial f}{\partial L_0} \cdot \Delta L_0 + \frac{\partial f}{\partial C_0} \cdot \Delta C_0 + \frac{\partial f}{\partial G_0} \cdot \Delta G_0; \quad \Delta\beta \approx \Delta\beta_R + \Delta\beta_L + \Delta\beta_C + \Delta\beta_G. \quad (2.9)$$

де $\Delta\beta$ - абсолютна похибка коефіцієнта фази.

Для різних частот обчислимо всі члени суми вирази (2.9) і результати зведемо до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення складових абсолютної похибки коефіцієнта фази

$f, \text{Гц}$	$\Delta\beta_R$	$\Delta\beta_L$	$\Delta\beta_C$	$\Delta\beta_G$
50	$4,095 \cdot 10^{-5}$	$8,513 \cdot 10^{-10}$	$7,866 \cdot 10^{-5}$	$-7,607 \cdot 10^{-5}$
1000	$3,925 \cdot 10^{-4}$	$3,553 \cdot 10^{-8}$	$4,406 \cdot 10^{-4}$	$-9,76 \cdot 10^{-5}$
$1 \cdot 10^6$	0,013	$1,095 \cdot 10^{-3}$	0,014	$-3,182 \cdot 10^{-6}$
$4 \cdot 10^8$	$1,034 \cdot 10^{-3}$	2,112	2,109	$-2,071 \cdot 10^{-8}$
$8 \cdot 10^8$	$5,171 \cdot 10^{-4}$	4,224	4,218	$-1,036 \cdot 10^{-8}$

Сумарна максимальна абсолютна похибка коефіцієнта фази визначається по формулі:

$$\Delta\beta_{\Sigma} \approx |\Delta\beta_{R1}| + |\Delta\beta_{L1}| + |\Delta\beta_{C1}| + |\Delta\beta_{G1}|. \quad (2.10)$$

Розрахуємо відносні похибки коефіцієнта фази по формулі:

$$\delta_{\beta_i} = \frac{\Delta\beta_i}{\beta} \cdot 100\%, \quad (2.11)$$

де i позначає параметр лінії (R, L, G, C). Отримані дані зведемо в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 - Значення складових відносною похибки коефіцієнта фази

$f, \text{Гц}$	$\delta_{\beta_R}, \%$	$\delta_{\beta_L}, \%$	$\delta_{\beta_C}, \%$	$\delta_{\beta_G}, \%$
50	2,5	$5,197 \cdot 10^{-5}$	4,814	-4,644
1000	2,5	$2,263 \cdot 10^{-4}$	2,806	-0,622
$1 \cdot 10^6$	2,301	0,199	2,496	$-5,785 \cdot 10^{-4}$
$4 \cdot 10^8$	$1,223 \cdot 10^{-3}$	2,499	2,496	$-2,45 \cdot 10^{-8}$
$8 \cdot 10^8$	$3,06 \cdot 10^{-4}$	2,5	2,496	$-6,127 \cdot 10^{-9}$

Результати обчислень представлені на графіки, рис. 2.1-2.4.

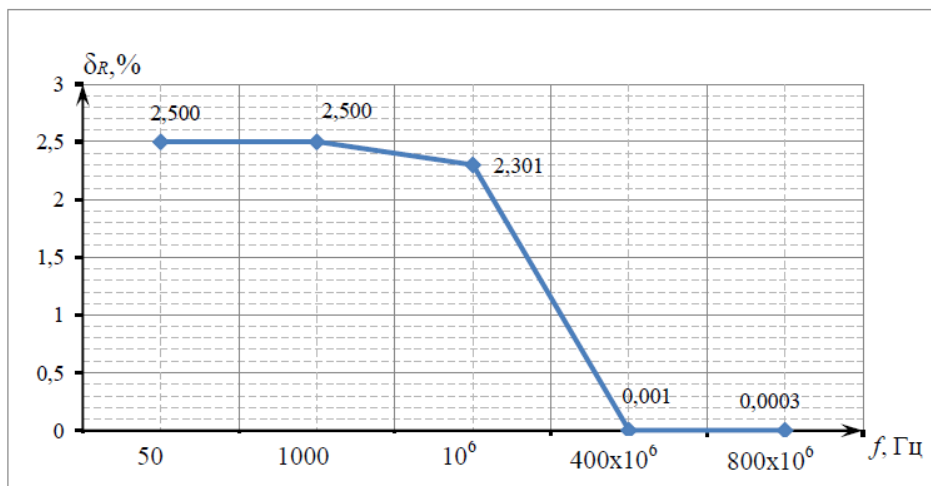


Рисунок 2.1 - Залежність відносної складової похибки, спричиненої відхиленням R_0

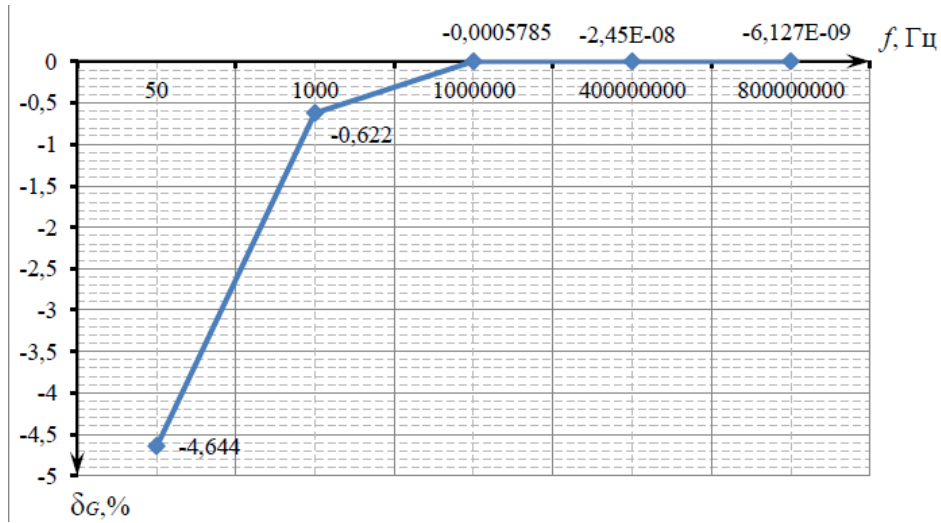


Рисунок 2.2 - Залежність відносної складової похибки, спричиненої відхиленням G_0

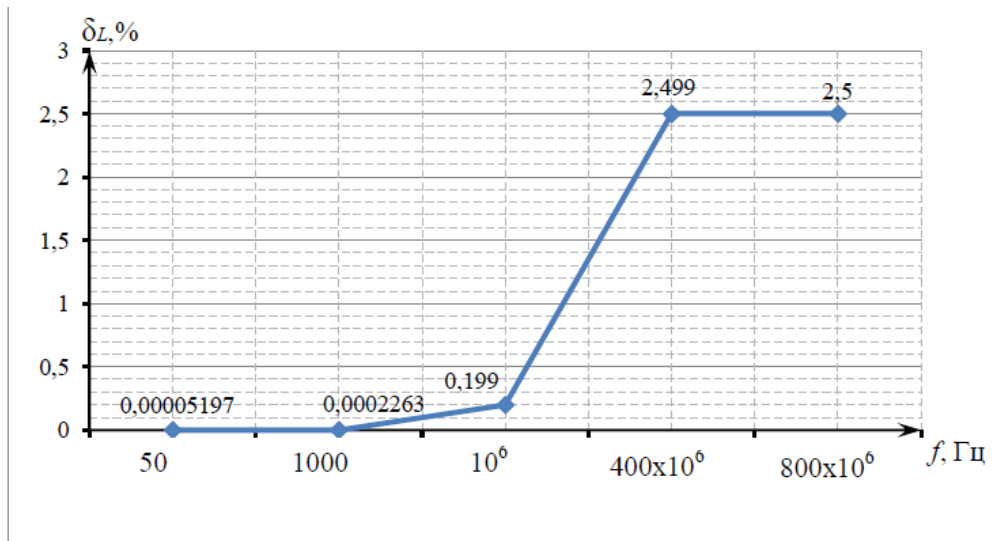


Рисунок 2.3 - Залежність відносної складової похибки, спричиненої відхиленням L_0

Визначимо значення абсолютних похибок фазовий швидкості для цих ж частот по формулі:

$$\Delta v = \frac{\partial v}{\partial \beta} \cdot \Delta \beta = -\frac{\omega}{\beta^2} \cdot \Delta \beta \quad (2.12)$$

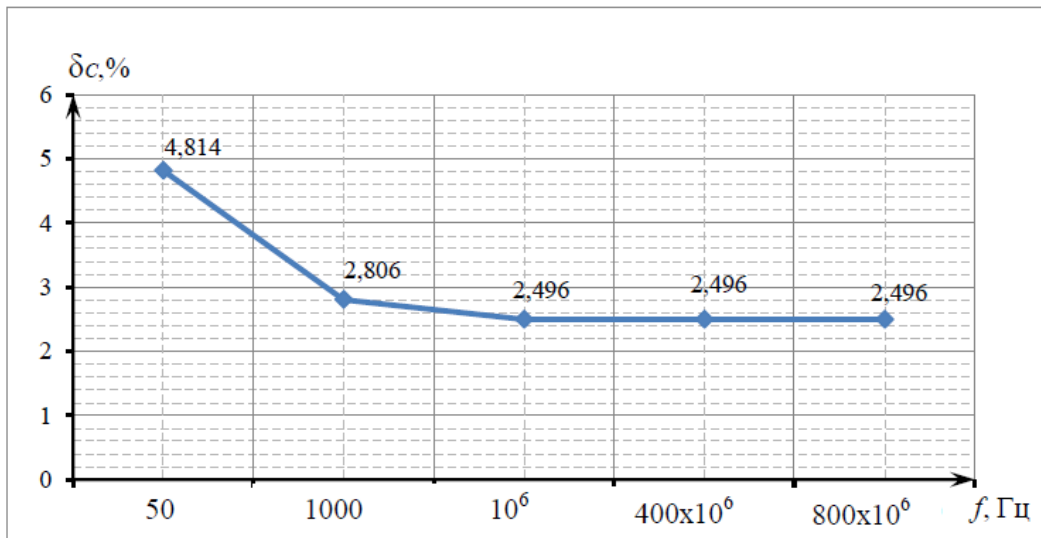


Рисунок 2.4 - Залежність відносної складової похибки, спричиненої відхиленням C_0

Далі обчислимо значення відносних похибок фазовий швидкості по формулі (2.13):

$$\delta_v = \frac{|\Delta v_i|}{v_i} \quad (2.13)$$

Результати обчислень представимо на графіку (рис.2.5)

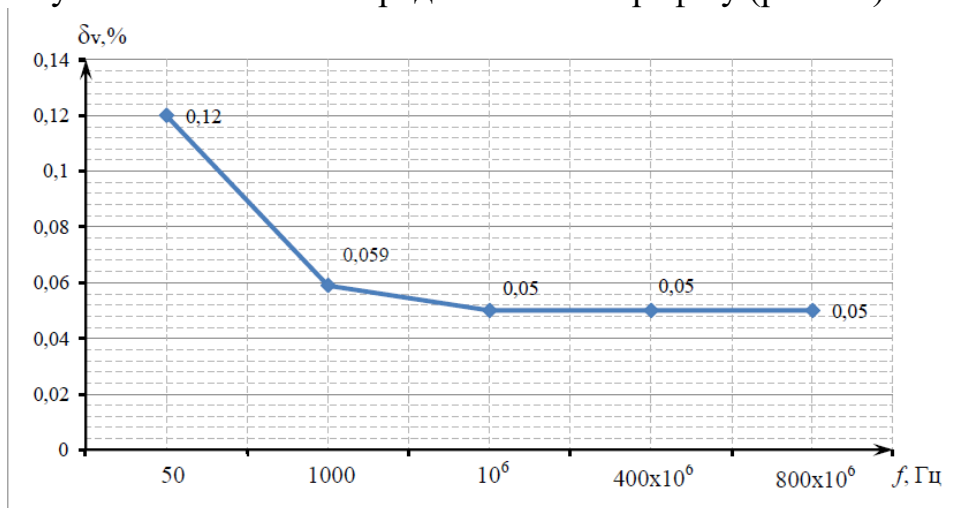


Рисунок 2.5 – Залежність відносної похибки, спричиненої фазовим відхиленням швидкості

Оскільки результатом контролю є відстань до аварії, то виконаємо розрахунок похибок для визначення відстані трьох значень відстаней $S_i = 120, 210, 300$ км.

Для обчислення використовуємо формули:

$$S = t \cdot v$$

$$t_i = \frac{S_i}{v_i}$$

$$\Delta S_i = t_i \cdot |v_i|$$

$$\delta_{S_i} = \frac{\Delta S_i}{S_i}$$

Результати розрахунків значень відносної похибки представимо в вигляді графіка (рис. 2.6), а абсолютних значень похибок визначення відстаней для заданих координат вигляді графіка (рис. 2.7)

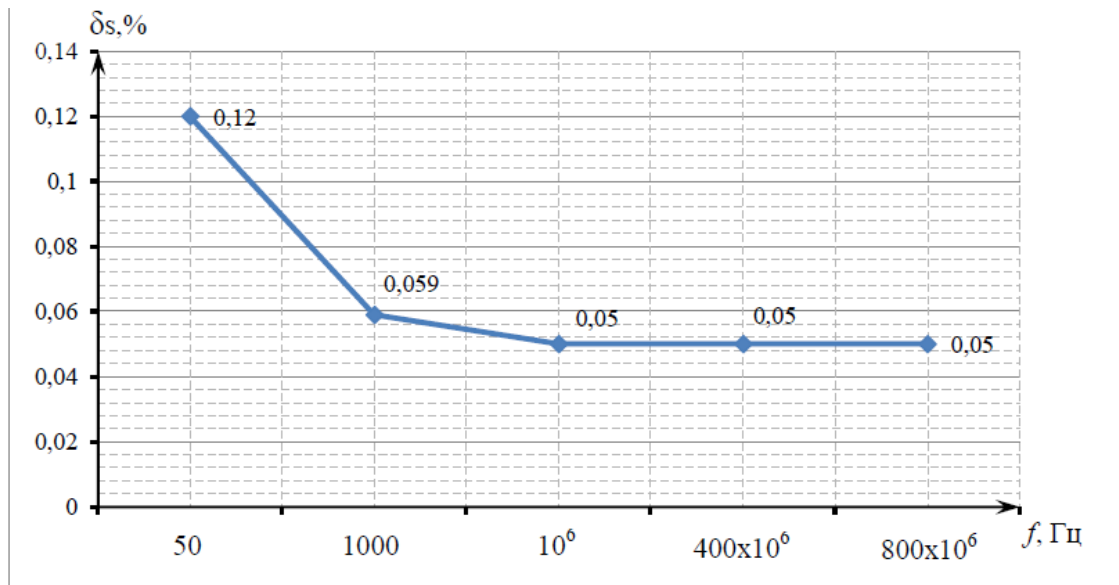


Рисунок 2.6 - Залежність відносної похибки, спричиненої відхиленням відстані до місця ушкодження

Визначимо абсолютну і відносну похибки при розрахунку коефіцієнта фази за повною (2.14) і спрощеною (2.15) формулах [5].

$$\beta_n(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\omega^2 L_0 C_0 - R_0 G_0 + \sqrt{(R_0 + \omega^2 L_0)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)} \right)} \quad (2.14)$$

$$\beta_{сп}(\omega) = \omega \sqrt{L_0 C_0} \quad (2.15)$$

$$\Delta\beta = \frac{\Delta\beta_{сп} - \Delta\beta_n}{\Delta\beta_n}, \quad (2.16)$$

де $\Delta\beta_{сп}$ - абсолютна похибка коефіцієнта фази при використанні спрощеної формули розрахунку,

$\Delta\beta_{п}$ - абсолютна похибка коефіцієнта фази при використанні повної формули розрахунку.

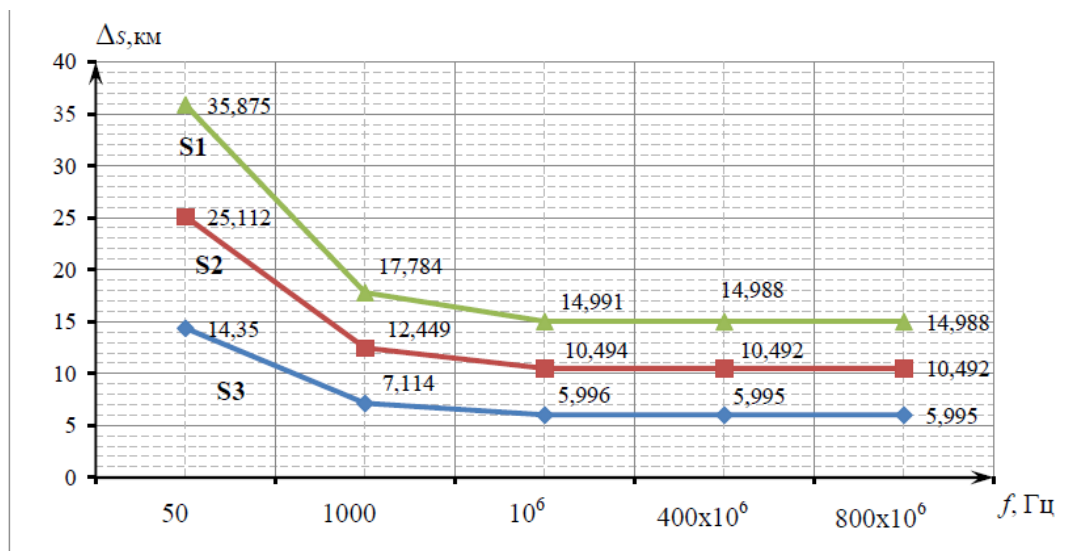


Рисунок 2.7 - Залежність абсолютної похибки від відстані до місця аварії

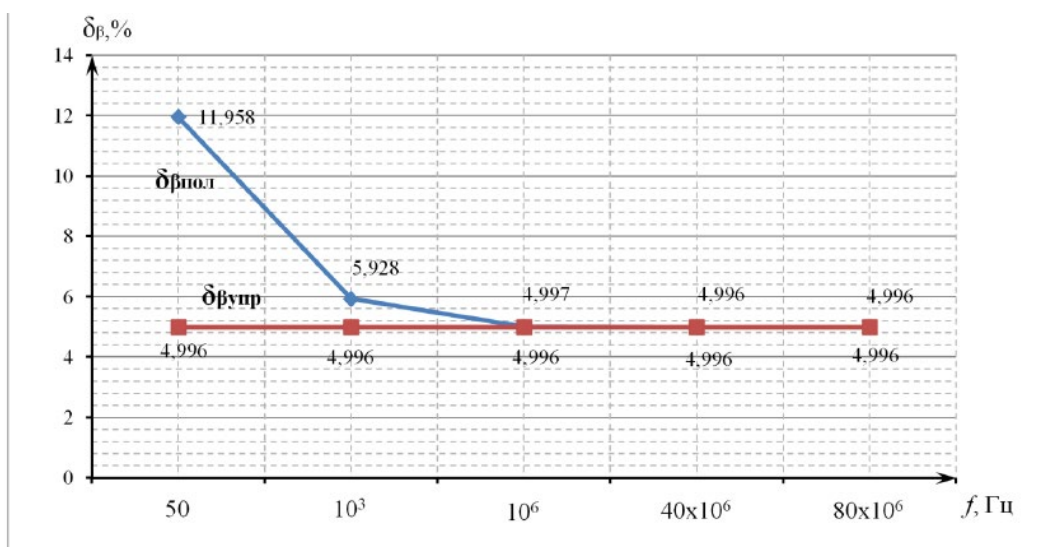


Рисунок 2.8 – Залежність відносної похибки, спричиненої відхиленням коефіцієнта фази при розрахунку повної та спрощеної формулами; $\delta\beta_{пов}$ – відносна похибка коефіцієнта фази при використанні повної формули розрахунку, $\beta_{спр}$ - відносна похибка коефіцієнта фази при використанні спрощеною формули розрахунку

2.2 Моделювання згасання гармонійних складових

Імпульсні рефлектометри, принцип дії яких заснований на локації зондуючого імпульсу по контрольованій ділянці лінії і на вимірі часу затримки відбитого від місця аварії імпульсу t . У якості переваг рефлектометрів необхідно відзначити наступне: порівняно проста операція контролю аварійних режимів ПЛЕП, а саме контроль виконується дистанційно. Зондуючий імпульс поширюється зі швидкістю v , а відстань до місця аварії визначається по формулі $l = 0,5v t$. Швидкість імпульсного сигналу залежить від діелектрика. Ця залежність виражається в вигляді [2]:

$$v = \frac{c}{\gamma} = \frac{c}{\varepsilon},$$

де c – швидкість світла, γ - коефіцієнт укорочення електромагнітної хвилі в лінії, ε -діелектрична проникність матеріалу ізоляції кабелю або повітряної середовища. Коефіцієнт укорочення γ показує во скільки раз швидкість поширення імпульсу в лінії менше швидкості поширення в повітря. Точність визначення відстані до місця ушкодження залежить від точності встановлення коефіцієнта укорочення. Слід зазначити, що на коефіцієнт укорочення здійснюють негативне вплив різні зовнішні фактори, які впливають не тільки на діелектричну проникність.

Тому метрологічний аналіз цього методу вимірювання дозволить виявити джерела похибок, розробити методи корекції похибок і відповідно покращити метрологічні Характеристики цих приладів і розширити сферу застосування цих приладів. У статті [1] наведено результати дослідження похибок виміру, обумовлених нестабільністю швидкості імпульсу. Однак на похибка вимірювання відстані до місця аварії впливає і форма імпульсу. Оскільки отримані співвідношення довгої лінії отримані для гармонійного сигналу [1], а прямокутний імпульс представляє собою суму нескінченного числа гармонійних складових. Тому коефіцієнти фази і згасання лінії залежать від частоти і при проходження прямокутного імпульсу по лінії форма його спотворюється. Крім того, оскільки рефлектометр підключається до лінії через конденсатор та фільтр, то ці частотно залежні елементи є

додатковими джерелами спотворення форми імпульсу. Для проведення метрологічного аналізу рефлектометра розглянуто процес проходження сигналу по лінії.

$$\alpha(\omega) = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\omega^2 L_0 C_0 R_0 G_0 + \sqrt{(R_0 + \omega^2 L_0)(G_0^2 + \omega^2 C_0^2)} \right)} \quad (2.17)$$

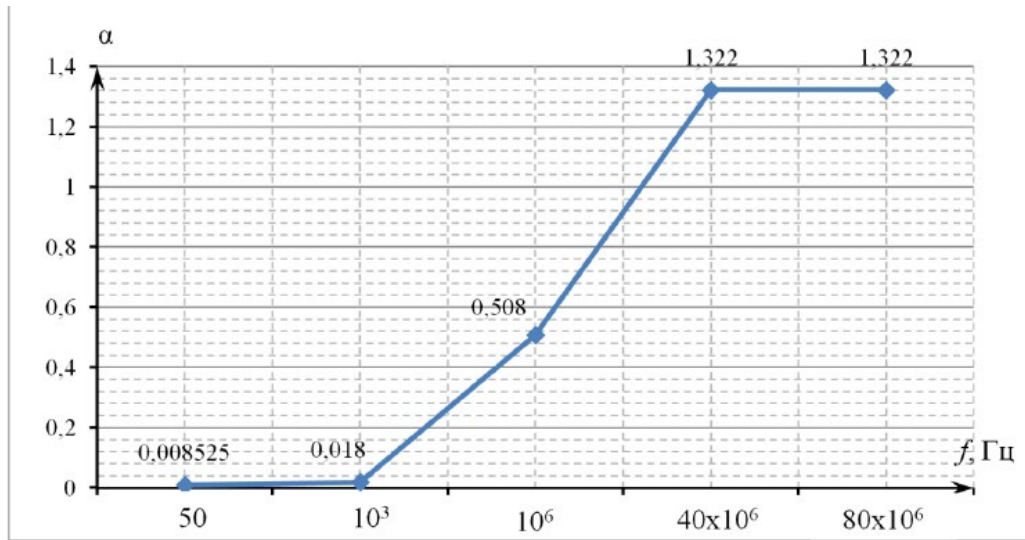


Рисунок 2.9 - Графік залежності коефіцієнта згасання від частоти

Потім знайдемо відхилення коефіцієнта згасання через відхилення параметрів R_0 , L_0 , C_0 , G_0 відповідно.

$$\Delta\alpha \approx \frac{\partial f}{\partial R_0} \cdot \Delta R_0 + \frac{\partial f}{\partial L_0} \cdot \Delta L_0 + \frac{\partial f}{\partial C_0} \cdot \Delta C_0 + \frac{\partial f}{\partial G_0} \cdot \Delta G_0 = \Delta\alpha_R + \Delta\alpha_L + \Delta\alpha_C + \Delta\alpha_G. \quad (2.18)$$

Сумарна максимальна абсолютна та відносна похибки коефіцієнта згасання визначається за формулою [6]:

$$\Delta\alpha_{\Sigma i} \approx |\Delta\alpha_{Ri}| + |\Delta\alpha_{Li}| + |\Delta\alpha_{Ci}| + |\Delta\alpha_{Gi}|. \quad (2.19)$$

Розрахуємо відносні похибки коефіцієнта згасання по формулі:

$$\delta_{\alpha i} = \frac{\Delta\alpha_i}{\alpha} \cdot 100\%. \quad (2.20)$$

де i позначає параметр лінії (R , L , G , C). Отримані дані зведемо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 - Значення складових відносної похибки коефіцієнта фази

f , Гц	$\delta_{\alpha R}$, %	$\delta_{\alpha L}$, %	$\delta_{\alpha C}$, %	$\delta_{\alpha G}$, %
50	2,5	0	0,178	4,644
1000	2,5	0	2,186	0,622
$1 \cdot 10^6$	2,699	0,199	2,496	0,0006
$4 \cdot 10^8$	4,999	2,499	2,496	0,0001
$8 \cdot 10^8$	5,0	2,5	2,496	0,0001

Результати обчислень представлені на графіки, рис. 2.10-2.13.

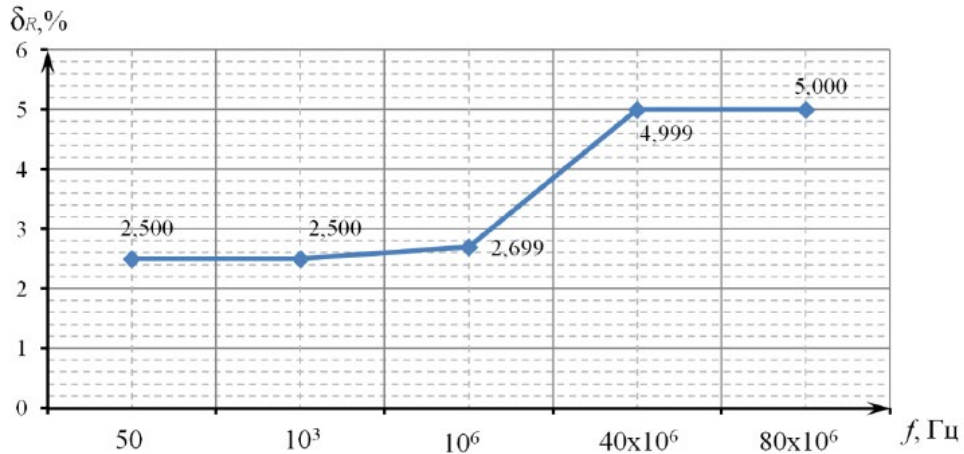


Рисунок 2.10 - Залежність відносного складника похибки, викликаного відхиленням R_0

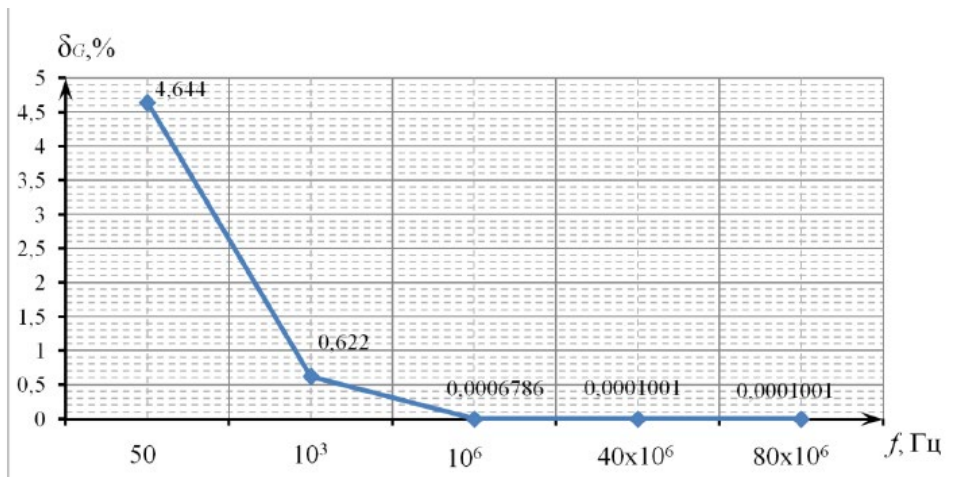


Рисунок 2.11 - Залежність відносного складника похибки, викликаного відхиленням G_0

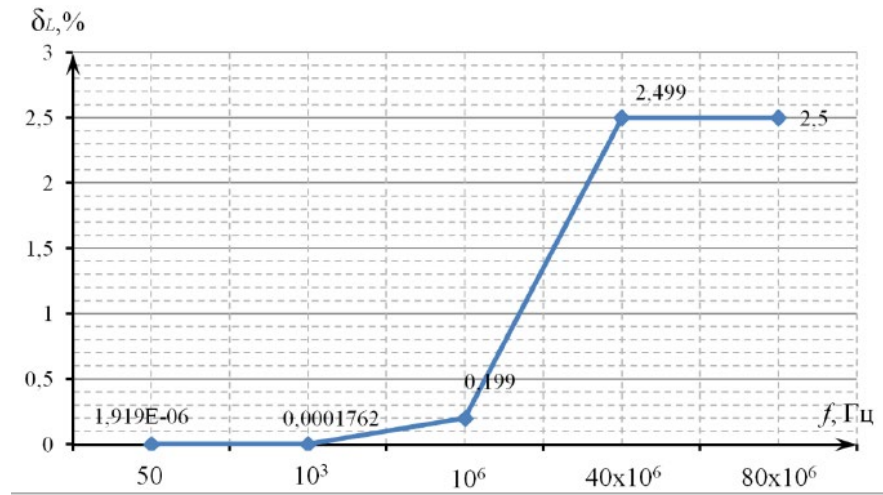


Рисунок 2.12 - Залежність відносного складника похибки, викликаного відхиленням L_0

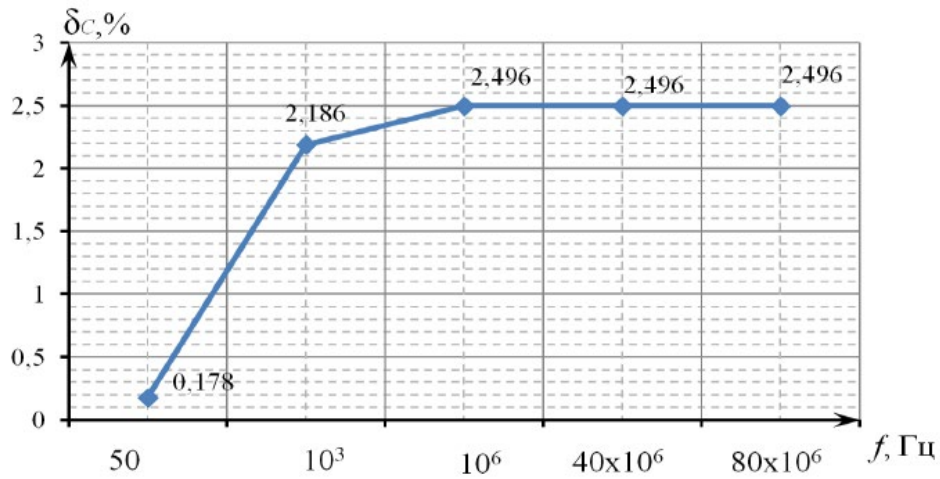


Рисунок 2.13 - Залежність відносного складника похибки, викликаного відхиленням C_0

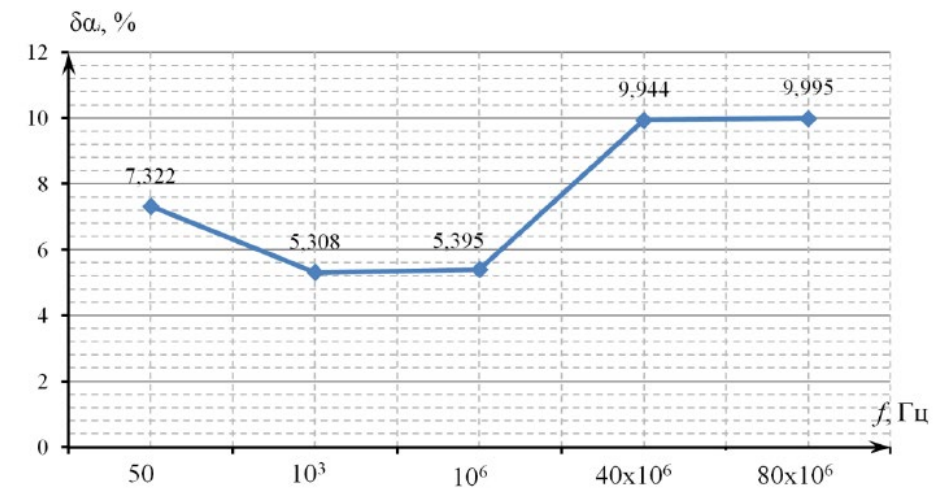


Рисунок 2.14 – Залежність відносної похибки коефіцієнта згасання від частоти

Висновки по другому розділу

З аналізу результатів розрахунків похибок коефіцієнтів фази та згасання слід, що значення похибок залежать від частоти гармонійний сигнал.

РОЗДІЛ 3

МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМИ ІМПУЛЬСУ СПЕКТРАЛЬНИМ
МЕТОДОМ

Форма імпульсу на виході лінії може бути визначена спектральним методом [9]. Знаючи спектральний склад вхідного впливу $F_{ex}(j\omega)$, який визначається згідно прямому перетворенню Фур'є, і частотну характеристику ланцюга $W(j\omega)$, можна визначити спектральний склад вихідної величини, та оцінити вплив частотної характеристики на вихідну напруга або струм.

Спектральна характеристика вихідної напруги чотиріполюсника має вигляд [9]:

$$F_{вых}(j\omega) = W(j\omega)F_{ex}(j\omega),$$

$$\text{де } F_{ex}(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} F_{вх}(t) \cdot e^{-j\omega t} d\omega.$$

Відповідно до зворотного перетворення Фур'є по спектральній характеристиці вихідного сигналу визначається оригінал

$$f_{вых}(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F_{вых}(j\omega) e^{j\omega t} d\omega.$$

Зауважимо, що східчасті і гармонійні впливу не є абсолютно інтегрованими в нескінченних межах. Спектральні характеристики таких функцій не можуть бути отримані з відповідних зображень по Лапласу шляхом заміни p на $j\omega$, інакше можна, можливо втратити імпульсну компоненту в вигляді дельта функції. Спектральна характеристика одиничної функції [10]:

$$F(j\omega) = \pi\delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}.$$

Знаючи комплексну спектральну щільність шуканої реакції, визначається

реакція за допомогою зворотного перетворення Фур'є [10]:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \pi \delta(\omega) W(j\omega) e^{j\omega t} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{W(j\omega)}{j\omega} e^{j\omega t} d\omega.$$

Частотна характеристика лінії отримана шляхом заміни оператора p в виразі на $j\omega$. Визначимо вираз $W(j\omega)$ у показниковій формі запису $W(j\omega) = |W(j\omega)| e^{j\psi}$, де $|W(j\omega)|$ - амплітудно-частотна характеристика, $\psi = \arg(W(j\omega))$ - фазо-частотна характеристика, тоді

$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(\omega) |W(j\omega)| e^{j(\omega t + \psi)} d\omega + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W(j\omega)|}{j\omega} e^{j(\omega t + \psi)} d\omega = \\ &= \frac{W(0)}{2} + \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W(j\omega)|}{j\omega} \cos(\omega t + \psi) d\omega + \frac{1}{2\omega} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W(j\omega)|}{j\omega} \sin(\omega t + \psi) d\omega \end{aligned}$$

Оскільки вхідний вплив містить нескінченне число гармонійних складових, при вирішенні спектральним методом їх кількість обмежується [10].

$$h(t) \approx \frac{W(0)}{2} + \frac{1}{\pi} \int_0^{\omega_c} \frac{|W(\omega)|}{\omega} \sin(\omega t + \psi) d\omega,$$

де ω_c - частота зрізу. Для визначення частоти зрізу використовується амплітудно-частотна характеристика лінії $|W(j\omega)|$. Частота зрізу ω_c вибирається таким чином, щоб значення $|W(\omega_c)|$ не перевищувало 1% від максимального $|W(j\omega)|$.

Представлений вище спектральний метод не дозволяє отримати рішення аналітично і тому для вирішення завдання необхідні чисельні методи. Необхідно відзначити, що чисельне рішення завдання зворотного перетворення Фур'є є досить складною. Тому для вирішення цього завдання доцільно використовувати більше простий метод, заснований на розкладанні вхідного періодичного сигналу в ряд Фур'є, розв'язання задачі для обмеженого числа гармонійних складових, а потім підсумовування складових гармонік і визначення форми вихідний сигнал [10].

Оскільки в рефлектометри в якості сигналу використовуються прямокутні імпульси, які репрезентують суму гармонійних складових, то очевидно при проходження імпульсу по лінії форма сигналу буде спотворена (рис.3.1). Нестабільність форми відбитого сигналу, що надходить на компаратор, є джерелом похибки $\Delta\tau$. Причому похибка обумовлена як залежністю фазової швидкості гармонійної складової від частоти, так і залежністю коефіцієнта згасання гармонійної складової від частоти.

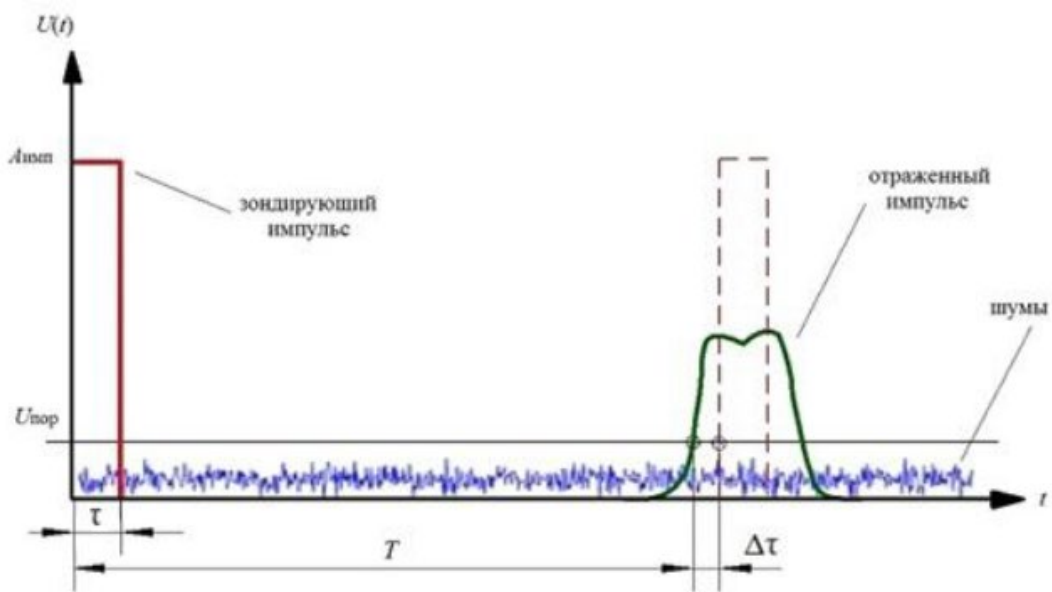


Рисунок 3.1 - Схема реєстрації відбитого імпульсу

Для кількісної оцінки ступеня спотворення форми імпульсу визначимо спектральним методом форму імпульсу.

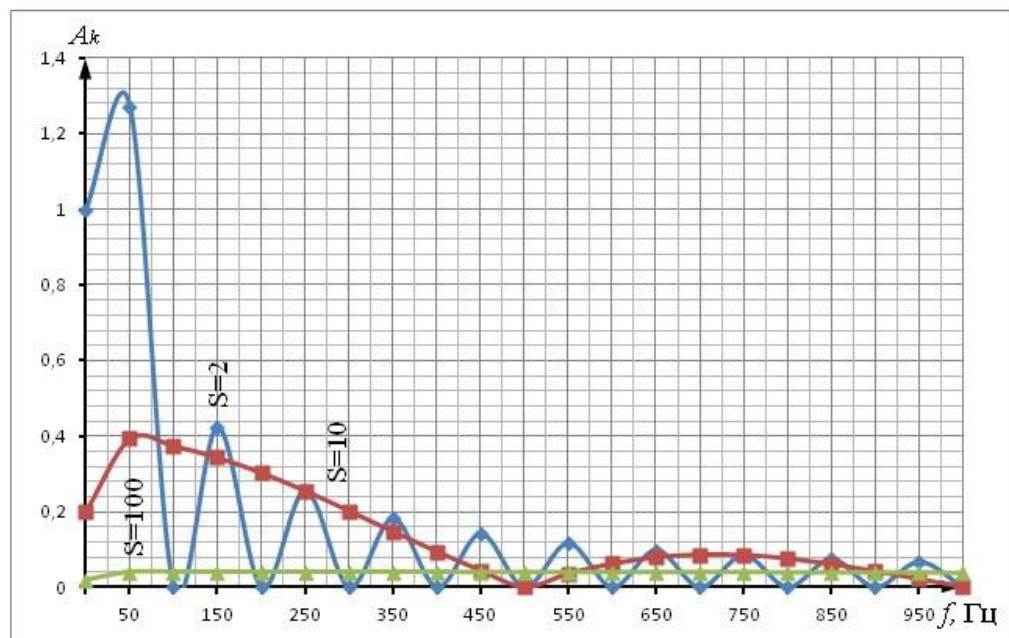
Будь-яка періодична функція $f(t)$ з періодом T може бути представлена у вигляді суми синусів та косинусів від аргументу $n\omega t$ за допомогою ряду Фур'є [9].

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t),$$

де n - ціле позитивне число; t - час; $\omega = 2\pi/T$ - кутова частота, p - оператор перетворення Лапласа;

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) d\tau; \quad a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \cos n\omega \tau d\tau; \quad b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) \sin n\omega \tau d\tau.$$

Будь-яка парна функція може бути розкладена в ряд Фур'є, що складається з косінусів, а будь-яка непарна функція розкладається у ряд з синусів. На рис.3.1 зображено зондуєчий імпульсний сигнал рефлектометра. Скважність сигналу визначається ставленням $S = T/\tau$. на рис. 3.2 представлені амплітудні частотні характеристики прямокутного імпульсу для різних значень шпаруватості. З цих залежностей слідує, що з збільшенням скважності значення амплітуд в низькочастотній ділянці спектру зменшуються. Необхідно відзначити, що діапазон вимірювання визначається значенням періоду сигналів, але для підвищення точності



вимірювання необхідно тривалість імпульсу зменшувати, відповідно шпаруватість імпульсу збільшувати [2].

Рисунок 3.2 - Амплітудні частотні характеристики прямокутного імпульсу для різних значень скважності

Ця залежність дозволяє вибрати діапазон частот при аналітичному визначенні форми відбитого сигналу.

Для рішення цього завдання використаний метод суперпозиції, а саме вхідний сигнал уявити в вигляді суми гармонійних складових. Використовуючи залежності коефіцієнтів фази і згасання від частоти, визначаються гармонічні складові сигналу на виході лінії, а потім по цим

складовим синтезується вихідний сигнал. Оскільки прямокутний імпульс містить нескінченне число гармонійних складових, то при розрахунках число гармонійних складових обмежується по скважності і мінімальному заданому амплітудному рівнем в відсотках від амплітуди першої гармоніки.

На рис. 3.3 наведено залежність амплітуди першою гармоніки від шпаруватості імпульсу.

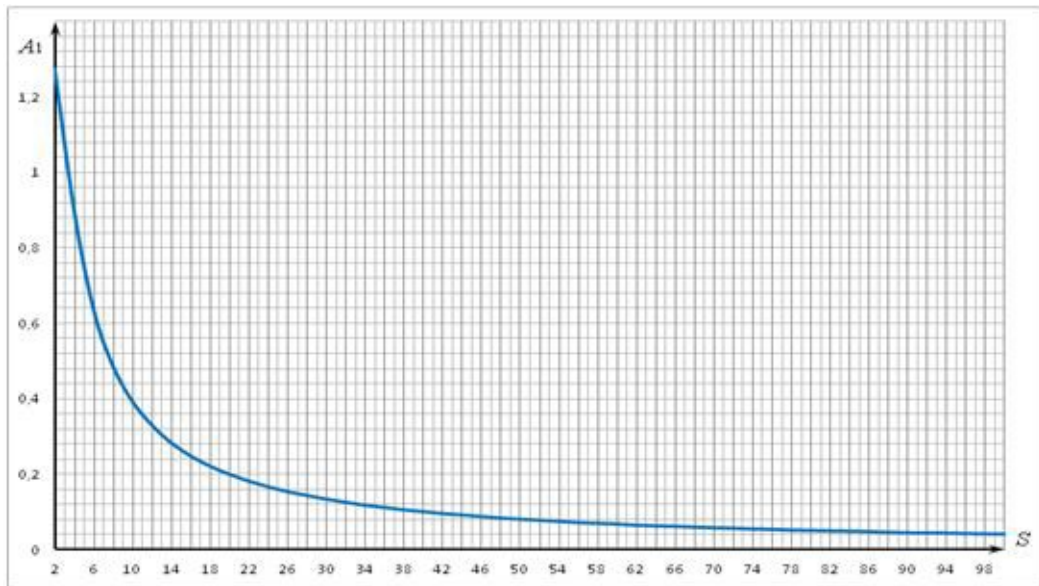


Рисунок 3.3 - Залежність амплітуди першою гармоніки від шпаруватості імпульсу

З курсу вищої математики відомо, що будь-яка періодична функція, що задовольняє умовам Діріхле, може бути розкладена в гармонійний ряд Фур'є [10]:

$$\begin{aligned} f(\omega t) &= A_0 + A_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + A_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \alpha_n) = \\ &= A_0 + \sum_{k=1}^n A_k \sin(k\omega t + \alpha_k), \end{aligned}$$

Окремі гармоніки ряду Фур'є можна, можливо уявити в вигляді суми синусної та косинусної складових без початкових фаз [10]:

$$\begin{aligned} A_k \sin(k\omega t + \alpha_k) &= A_k \cos \alpha_k \cdot \sin k\omega t + A_k \sin \alpha_k \cdot \cos k\omega t = \\ &= B_k \cdot \sin k\omega t + C_k \cdot \cos k\omega t. \end{aligned}$$

Остаточню рівняння імпульсного прямокутного сигналу, проходить по

лінії з розподіленими параметрами, прийме вигляд [10]:

$$u(x,t) = A_0 e^{-\alpha(0)x} + \sum_{k=1}^n A_k e^{-\alpha(k\omega)x} \cos(k\omega t - \beta(k\omega)x + \psi_k).$$

Рівняння (3.5) дозволяє синтезувати вихідний сигнал після імітації проходження всіх гармонійних складових по лінії з розподіленими параметрами, що було реалізовано в *Mathcad* при моделюванні передачі по проводах ПЛЕП 110 кВ зондуючих прямокутних імпульсів амплітудою 2 В і частотою 50 Гц. При фіксованих значеннях $x = 0$ та $x = 2l$ були отримані відповідно графіки вхідного та вихідного сигналів (рис. 3.4), які наочно демонструють спотворення форми імпульсу, що вноситься лінією.

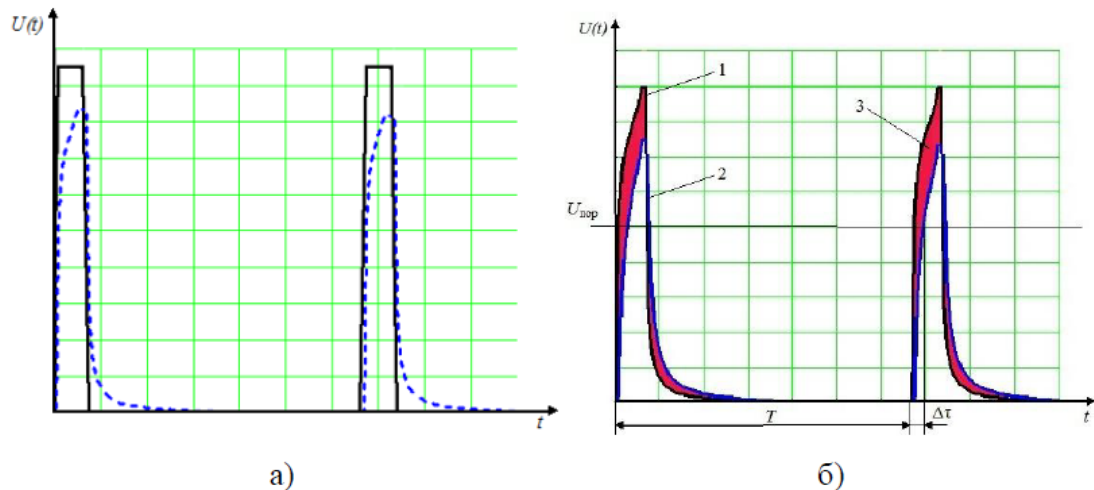


Рисунок 3.4 – а) графіки вхідного та вихідного сигналів; б) 1 – вихідний сигнал при номінальних параметрах лінії, 2 - вихідний сигнал при відхиленні значень параметрів лінії від номінальних, 3 – розмитість сигналу від нестабільності параметрів лінії

Запропонований метод дозволяє аналітично визначити форму імпульсу і нестабільність форми через впливу зовнішніх факторів на параметри лінії. Метод корекції похибок вимірювання може бути реалізований при створенні рефлектометрів з покращеними метрологічними характеристиками.

Висновки по третьому розділу

1. Внаслідок моделювання процесів проходження імпульсу в лінії отримані математичні висловлювання, що дозволяють проводити дослідження впливу відхилення параметрів лінії на швидкість переміщення імпульсу та його форму.

2. З результатів моделювання впливу відхилень параметрів довгою лінії на похибка визначення місця аварії слідує, що невеликі відхилення параметрів є джерелами значних похибок визначення місця аварії.

3. Отримані функціональні залежності відхилень параметрів лінії на відхилення результату вимірювання відстані при доповненні їх функціональними залежностями впливу зовнішніх факторів на параметри лінії можуть бути використані для автоматичної корекції похибки вимірювання відстані до аварії.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз методів та засобів ВМП ліній електропередачі з якого випливає, що в даний час всі існуючі методи поділяються на дві групи: топографічні та локаційні, яким притаманні переваги та недоліки, локаційні прилади підкуповують своєю економічністю та простотою монтажу та експлуатації, а їх недоліком є недостатня точність.

2. Проведено аналіз фізичного принципу дії локаційних методів, з якого випливає, що на точність визначення відстані найбільший вплив надають відхилення параметрів довгої лінії, що залежать від різних конструктивних факторів, географічних і кліматичних.

3. Отримано функціональні залежності впливу відхилень параметрів лінії на похибку вимірювання відстані, які є теоретичною основою для проектування блоку автоматичної корекції похибки вимірювання.

4. Виконано аналіз похибок, зумовлених відхиленням зовнішніх факторів, з якого випливає, що значення похибок значно перевищують значенню, наведені у паспорті. З іншого боку, результати аналізу підтверджують досвід практичної експлуатації рефлектметрів.

5. Проведено аналіз впливу зовнішніх факторів на параметри довгої лінії, з якого випливає, що одна частина факторів повільно змінюються в часі, а інша частина – швидше, і на підставі цього було запропоновано здійснювати корекцію похибок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гончаренко Ю. П., Ковбасюк С. В., Полещук І. І., Прядко В. А. Обґрунтування структури пристрою діагностування технічного стану розподільних електричних мереж // Вісник Хмельницького національного університету, №1, 2022 (305)

2. Гончаренко Ю. П., Прядко В. А., Полещук І. І., Синьківський В. А., Остра Н. В. Пропозиції щодо визначення виду зондуючого сигналу засобів локаційного діагностування технічного стану розподільних електричних мереж. // Вісник Хмельницького національного університету /серія: Технічні науки №1, 2022 С.305-312

3. Матвієнко С. В. Моніторинг технічного стану електричних мереж з ізольованою нейтраллю на основі розподіленої системи RC-фільтрів з обмежувачами перенапруг та телеметрією напруг / С.В. Матвієнко, В.П. Янович, О.О. Рубаненко, В.В. Явдик // Збірник наукових праць ВНАУ: Серія техніка, енергетика, транспорт АПК. – 2018. – № 2. – С. 48–53.

4. В.В. Кирик Електричні мережі і системи. Режими роботи розімкнених мереж. Навч. посіб./Кирик В.В.. НТУУ «КПІ»-2014-130 с./https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/19118/2/POSIB_EMS_ENG_2015-67-138.pdf

5. Г. О. Шеїна Аналіз математичних моделей ліній електропередачі // Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет» ISSN 2074-2630 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика» №2(23) 2020

6. Ю. В. Чернецька, А. І. Замулко, Система моніторингу технічного стану розподільчих електричних мереж/ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ/ Энергосбережение • энергетика • энергоаудит-№9 (91) 2011

7. <https://eximpribor.com.ua/ua/indikator-korotkogo-zamykanija-rotornogo-tipa.html#>:
8. <https://iron-harry.ua/tovar/1/5/69/>
9. А. І. Сегін Побудова спектральних моделей сигналів в різних теоретико-числових базисах та представлення їх в полярній системі координат Тернопільський національний економічний університет,
10. Теорія сигналів та електричних кіл. Теорія сигналів : конспект лекцій / укладачі : О. М. Кобяков, О. В. Д'яченко, І. Є. Бражник, Т. О. Протасова. – Суми : Сумський державний університет, 2022. – 125 с.
11. Техніка високих напруг. Навчальний посібник. Укл. П.Д. Мар'янчук, Е.В. Майструк. — Чернівці: Рута, 2010. – 90 с
12. Dube, M. Non-Invasive Detection of Faults in Power Lines / M. Dube, N. Cagnon, A. Hainese. – Worcester: WPI, 2008. – 69 p.
13. Huang, Qi. A novel approach for fault location of overhead transmission line with noncontact magnetic-field measurement / Qi Huang, Wei Zhen, P. W. T. Pong // IEEE Transactions on power delivery vol. 27, № 3. – 2014. – P. 1186-1195.