

## ПРИНЦИПИ ФАЗОЧАСТОТНОГО ПІДХОДУ ДО ДІАГНОСТИКИ СТАНУ ПРОВІДНИКОВИХ ЛІНІЙ

*Розроблено та представлено базис фазочастотного підходу в діагностуванні стану провідникових ліній. Показано, що фазовий метод при умові зміни частоти тестового сигналу вироджується у імпульсний метод діагностування, але в "уявному" часі. Такий підхід ґрунтується на спільності фізичної природи понять "фаза" та "частота".*

*Застосування фазових методів вимірювання відстаней є точним методом. Але застосування його в провідникових лініях має певні обмеження. Наявність невизначеного за параметрами пошкодження або зміни параметрів лінії призводить до появи додаткового кута зсуву фази. Застосування фазочастотного підходу до аналізу сигналів відбиття дозволяє зменшити вплив цих факторів на точність визначення відстаней.*

*Ключові слова: кут зсуву фази, швидкість розповсюдження.*

K.L. HORIASCHENKO

Khmelnitsky national university, Ukraine

## PHASE-FREQUENCY PRINCIPLES OF DIAGNOSIS APPROACH WIRING LINES

*Developed and presented base phase-frequency approach to diagnosing the state of conductor lines. It is shown that the phase method provided the test signal frequency changes degenerates in pulse diagnosis method, but "imaginary" time. This approach is based on the common physical nature of the concepts of "phase" and "frequency".*

*Application phase methods of measuring distances are accurate method. But its use in semiconductor lines has certain limitations. The presence of unspecified parameters for damages or change the settings line leads to an additional phase shift angle. The use of phase-frequency approach to signal analysis reflectance can reduce the impact of these factors on the accuracy of distances.*

*Keywords: phase shift angle, speed distribution.*

**Вступ.** Одним з актуальних питань сучасності є і залишається актуальним забезпечення діагностики стану провідникових ліній, що забезпечують передачу електричної енергії низького, середнього та високого рівня напруги (LV, MV, HV). Одночасно з цим, задача діагностики стану провідникової лінії ставиться і до провідникових ліній зв'язку.

Теоретичні та практичні аспекти розв'язку задач в цій області розглянуто в роботах таких вчених як: Гроднев И.И., Андреев В.А., Шалит Г.М., Аксенов Ю.П., Лебедев Г.М., Ляпіна А.Г., Кадомска К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Сахно В.В., Benjamin T.L., Chen C.S., Roemer L.E., Robinson S.R., Thorn D.C., Grumbach R.S., Backmann M., Pfeiler C., Wabmuth A. та інших [1, 2, 3].

Діагностика кабельних ліній проводиться періодично із застосуванням як неруйнуючих так і руйнуючих методів аналізу стану лінії. Фактично, обслуговування кабельних ліній стоїть перед завданням використання існуючих кабельних мереж протягом їх часу експлуатації, використанням кабельних ліній понад їх експлуатаційний період, а також проведення заходів з виявлення та поступової заміни старих кабелів на більш сучасні.

Застосування фазового методу для визначення стану провідникових ліній є зручним інструментом для аналізу стану лінії. Простота аналізу отриманих даних шляхом вимірювання кута зсуву відбитого сигналу широко застосовується в задачах радіонавігації, в задачах вимірювання відстаней до будь-якого об'єкту. В роботах [4, 5] показано застосування фазових вимірювань, а у [6] – принципи побудови ноніусних фазометричних вимірювачів, що можуть бути використані в задачах застосування фазового методу вимірювання.

### Постановка задачі дослідження

Наявна простота фазових методів вимірювання часто базується на використанні принципових обмежень, що в свою чергу і унеможливають використання фазових методів вимірювання в першому наближенні. Слід звернути увагу на той факт, що типове застосування фазового методу вимірювання відстаней до пошкоджень ґрунтується на ряді принципових позиції, а саме:

1) Існування повного відбиття сигналу від об'єкту або пошкодження. Проте повне відбиття є лише одним з випадків проходження сигналу. Зазвичай поняття "повного відбиття" може бути застосовано лише за умов існування короткого замикання або обриву стосовно провідникового середовища розповсюдження електричного сигналу [7]. На практиці, провідникова лінія може містити пошкодження [7], а тому сигнал може проходити через таке пошкодження з частковим поверненням енергії.

2) Кут відбиття сигналу від пошкодження є  $180^\circ$  (або  $\pi$  радіан), а знак кута відбиття "+" або "-" визначається тільки типом об'єкту та відповідним знаком коефіцієнту відбиття  $\Gamma$  [9]. Як було розглянуто у роботах [9, 10] коефіцієнт відбиття не завжди є тільки "+1" (обрив) або "-1" (коротке замикання). Таке значення коефіцієнта відбиття є лише крайнім випадком. На практиці, коефіцієнт відбиття в межах від -1 до +1 для так званих "часткових пошкоджень". Зміни внутрішнього стану кабелю (осердя або оболонки), як це показано у [11], значно частіше призводять до часткових пошкоджень і лише з часом ведуть до повного

руйнування.

3) Сталість швидкості розповсюдження сигналу в діапазоні робочих частот проведення вимірювання. Швидкість розповсюдження визначається як  $u = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ . Для високих частот, швидкість розповсюдження може бути прийнята як достатньо стала величина, проте в роботі [7] показано, що величини  $L$  та  $C$  є частото залежними, а отже і швидкість  $u$  є також залежною від частоти сигналу.

Наявність таких умов призводить до проблеми застосування фазових методів в оцінюванні та вимірюванні відстаней до пошкодження, особливо якщо таких пошкоджень є два або більше.

**Аналіз та визначення шляхів вирішення**

Таким чином, застосування фазових методів вимагає більш ґрунтовного визначення умов застосування, та їх врахування, на відміну від інших досліджень застосування фазових методів.

Отже, фазовий метод визначення відстаней у провідникових лініях ґрунтується на визначенні відстані до пошкодження  $l$  шляхом визначення кута зсуву фази  $\varphi$  при відомій частоті  $f_s$  зонduючого сигналу. В відомому виразі [4]:

$$\varphi = \frac{2\pi \cdot 2l}{v_{wave}} \cdot f_s = 2\pi \frac{2l}{\lambda_{wave}}, \tag{1}$$

причому швидкість розповсюдження електромагнітної хвилі  $v_{wave}$  приймається постійною в робочому діапазоні  $f_{s \min} \dots f_{s \max}$ . Також в цьому виразі приймається повне відбиття сигналу від поверхні відбиття. Тобто, сигнал відбиття не змінює свою фазу після відбиття.

Наявність пошкодження в лінії призводить до відбиття енергії падаючого сигналу та утворенні відбиття [7]. Але, як відомо, пошкодженням у провідниковій лінії може виступати не тільки коротке замикання та обрив. Також, у якості пошкодження може бути і часткове пошкодження провідникової лінії, в наслідок чого виникає зміна хвильового опору на певній ділянці лінії.

**Сутність фазочастотного підходу діагностики провідникових ліній**

Розглянемо кожен з трьох принципових позицій з точки зору класичних методів та фазочастотного підходу, що запропоновано автором.

**Перша позиція.** Розглянемо режим неузгодженого навантаження характерний для випадку появи пошкодження на певній частині довжини лінії або в кінці лінії. В спрощеному вигляді розглядається неузгодженість навантаження, що розміщена в кінці лінії. Представляє собою зміну опору  $Z_n = 0$  або  $Z_n = \infty$ . У цьому режимі співвідношення опорів лінії та навантаження визначається виразом  $Z_n \neq Z_c$ . Отже, з'являються прямі і зворотні хвилі (рис. 1).

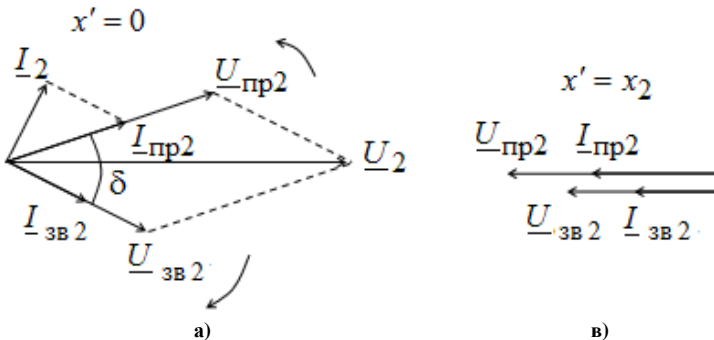


Рис. 1. Положення векторів струмів і напруг прямої і зворотної хвиль

З ростом відстані від кінця лінії, вектори хвиль відбиття знаходяться під певним кутом, що визначається відстанню до пошкодження та частоти сигналу, що використовується для зондування лінії [4]. Причому особливо слід відмітити, що приріс кута зсуву фази ( $j_i = 2p \cdot 2l_i / l$ ) є прямопропорційний не тільки відстані ( $l_i$ ), а й довжини хвилі тестового сигналу ( $l$ ). Як видно з рисунку 1, якщо відбиттів два, то і складових сумарного вектору також дві:

$$j_1 = 2p \cdot 2l_1 / l \text{ та } j_2 = 2p \cdot 2l_2 / l .$$

В роботі [10] детально показано утворення процесу обертання векторів відбиттів як функції приросту кута зсуву фази до приросту частоти сигналу, що зондує лінію. Тобто визначається так звана "частота обертання" вектору відбиття, що в загальному визначається як :

$$\Omega_i = 2l_i / u, \tag{2}$$

де  $u$  – швидкість розповсюдження сигналу в середовищі.

Вираз (2) є складовим між такими фізичними поняттями як "частота" та "фаза". Проте, як видно з

виразу (2), утворена "частота обертання" є функцією не від фізичного часу, а від частоти або довжини хвилі.

Перехід від хибного розуміння результатів вимірювання кутів зсуву фази як результату статичного вимірювання та перехід саме до аналізу динаміки зміни кута зсуву фази є принциповою відмінністю в запропонованому фазочастотному розумінні фізичної природи процесів, що відбуваються в лінії.

**Друга позиція.** Особливо показним для фазочастотного підходу є здатність робити з врахуванням додаткової зміни кута зсуву фази сигналу відбиття, що має місце в лінії за умов неузгодженості. В відомих методах застосування фазового методу ґрунтується саме на принциповому обмеженні – припущенні, що зсув фази буде лише +180 або -180 градусів як для випадків обриву або короткого замикання.

Відомо, що за наявності реактивної складової можливим стає довільне значення кута зсуву фази. Виникає зміна кута сигналу відбиття  $q$ . З виразу (5) та (6) слідує, що додаткова зміна кута зсуву фази сигналу відбиття буде визначатись як:

$$q_n = \begin{cases} p - 2 \arctan \frac{X_n}{R_0}, & \text{при } X_n > 0; \\ -p - 2 \arctan \frac{X_n}{R_0}, & \text{при } X_n < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Тобто вираз (1) з врахуванням (3) трансформується до:

$$\varphi = 2\pi \frac{2l}{\lambda_{wave}} + \theta_n, \quad (4)$$

Таким чином, визначення відстані згідно виразу (4) стає ускладненим. Тоді й відстань можна визначити як:

$$l = \frac{(j + q_n) \cdot l}{2 \cdot 2p}.$$

На рис. 2 [12] показано зміна кута сигналу відбиття при зміні  $X_L$  від -250 до +250 Ом згідно виразу (3). А тому при невідомому характері навантаження визначення відстані навіть до одного пошкодження є априорі неможливим при застосуванні класичного фазового методу вимірювання відстаней.

Для фазочастотного підходу, навпаки, наявність додаткової зміни кута зсуву фази сигналу відбиття не є настільки

принциповою проблемою. За умови  $\frac{X_n}{R_0}; const$  при  $f \in [f_{min}, f_{max}]$ , значення  $q_n$  згідно виразу (3) також

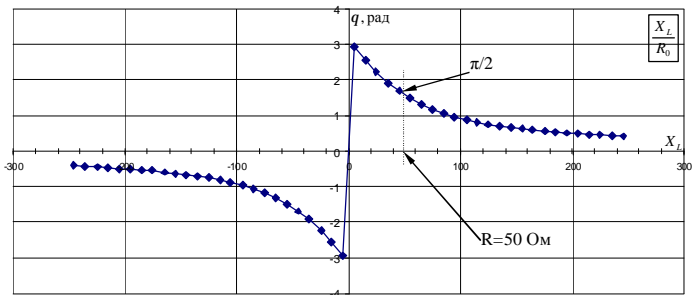


Рис. 2. Зміна кута сигналу відбиття  $\theta$  при зміні відношення  $X_L/R_0$ ,  $R_0=50$  Ом

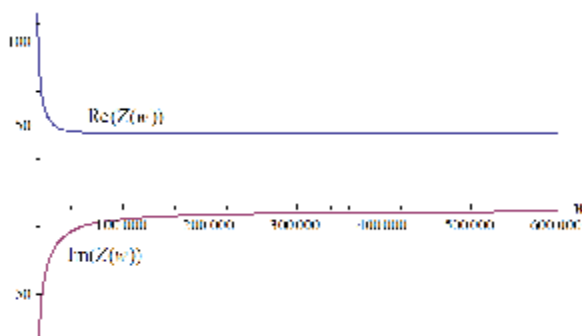


Рис. 3. Зміна дійсної та уявної частин хвильового опору лінії  $Z_{xe} [W]$

достить низькочастотному діапазоні.

буде залишатись сталим, а тому приріст кута зсуву фази від зміни частоти зонduючого сигналу також буде незмінним.

**Третя позиція.** Найбільш складною для використання в практиці вимірювань є швидкості розповсюдження сигналу в діапазоні робочих частот. В роботі [13] було досліджено шляхом моделювання та показано, що нажаль, параметри кабелю є частотозалежними. А це впливає на швидкість розповсюдження. Проте, з рис. 3 видно існування області достатньо сталих параметрів, яка обумовлює відносно сталість швидкості розповсюдження. Причому у

## Висновки

1. Запропонований фазочастотний підхід є інструментом дослідження, який дозволяє проводити дослідження в провідниковій лінії шляхом застосування розуміння фізичної природи процесів, що мають місце в провідниковій лінії. Як показано в роботі, фазочастотний підхід дає використовує саме динаміку процесу, а не аналіз за декількома статичними точками вимірювань. Причому слід відмітити особливо те, що на відміну від "динаміки в фізичному часі", в фазочастотному підході має місце "динаміка в уявному часі", або "динаміка зміну процесу від зміни частоти зонduючого сигналу". Що в практичній площині означає можливість виконання кожного циклу вимірювання для певного значення частоти зондування не

миттєво, а маючи достатній часовий ресурс.

2. Фазочастотний підхід є єдиним серед існуючих методів аналізу, що є принципово толерантним до додаткового кута зсуву фази, який зазвичай має місце при неузгодженості опору навантаження та лінії.

### Література

1. Гильманов Эдуард Ахнафович. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий передачи на основе их диагностики методом импульсной рефлектометрии / Эдуард Ахнафович Гильманов // автореф. ... к. т. н. по спец. 05.12.13, Уфа, 2009. – 20 с.
2. Hartlein, R., Hampton, N., Hernández, J.C., and Perkel, J. Overview of cable system diagnostic technologies and application / The National Electric Energy Testing Research and Applications Center (NEETRAC), Cable Diagnostic Focus Initiative Project (CDFI), No. 04-211 and 04-212, 2006
3. Reder W., Flaten D. Reliability Centered Maintenance for Distribution Underground Systems // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1, 2000, pp. 551-556.
4. Чмых М.К. Цифровая фазометрия / М.К. Чмых. – М.: Радио и Связь, 1993. – 184 с.
5. Пестряков В.Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории) / В.Б. Пестряков. – М.: Советское радио, 1968. - 468 с.
6. Богородицкий А.А. Нониусные аналого-цифровые преобразователи / А.А. Богородицкий, А.Г. Рыжевский. – Библиотека по автоматике, выпуск 533. – М. : Энергия, 1975. – 120 с.
7. Горященко К.Л. Пошкодження провідникових ліній та їх моделі / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – №5. – С. 185-188
8. Горященко К.Л. Класичні моделі провідникових ліній передач / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – №3. – С. 98-101
9. Горященко К.Л. Дослідження перевідбиттів гармонійних сигналів у провідникових лініях зв'язку для випадку двох пошкоджень / К.Л. Горященко, О.І. Полікаровських, В.Є. Гавронський // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2008. – №2. – С. 138-140
10. Горященко К.Л. Обертання часових складових сумарного сигналу в фазовій дальнометрії / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2007. – № 1. – С. 144-147.
11. Горященко К.Л. Діагностика технічного стану провідникових кабельних ліній / К.Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2012. – №2. – С. 61-64.
12. Горященко К.Л. Проблеми застосування фазового методу для визначення відстаней до пошкоджень в провідникових лініях / К.Л. Горященко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – №1. – С. 118-121
13. Горященко К.Л. Використання середовища Wolfram Mathematica в процесі моделювання кабельних ліній / К.Л. Горященко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2013. – №4. – С. 241-244.

Рецензія/Peer review : 8.1.2016 р. Надрукована/Printed :25.2.2016 р.  
Рецензент: д.т.н. Троцишин І.В.