

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРВИННИХ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Д. А. Маєвський<sup>1</sup>, О. М. Бесараб<sup>1</sup>, О. М. Семенюг<sup>2</sup>, О. Ю. Маєвська<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Одеський національний політехнічний університет

<sup>2</sup>Інжинірингова компанія «С-Інжиніринг»

**Анотація.** В статті запропоновано спосіб експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач. Основою методу є математичні моделі лінії з розподіленими параметрами. Параметри визначаються з використанням найпоширеніших вимірювальних приладів – амперметра, вольтметра та фазометра. Запропонований метод можна використовувати усіх типів ліній електропередач. Виконано експериментальну перевірку знайдених первинних параметрів.

**Ключові слова:** Питомі параметри, первинні параметри, питомий опір, питома індуктивність, питома ємність, питома провідність, лінія електропередачі, кабельна лінія.

### Вступ

До первинних параметрів лінії передачі електричної енергії відносять значення опору та індуктивності лінії, а також ємності та провідності між проводом та екраном (землею). Для трифазних ліній до перелічених параметрів додаються взаємні ємності, індуктивності та провідності між окремими проводами лінії, а також між окремим проводом та екраном. Усі ці параметри визначаються на одиницю довжини лінії (на практиці – найчастіше на метр або кілометр). Первинні параметри є конструктивно обумовленими, тобто залежать від геометричних розмірів лінії та матеріалів, із яких вона виготовлена.

Знання первинних параметрів ліній електропередач є передумовою для розрахунків їх електричних режимів. Будь-яка, навіть найбільш досконала математична модель будь-яких режимів роботи лінії, за визначенням не може забезпечити точних результатів, якщо точно не будуть відомі первинні параметри лінії.

Для отримання значень первинних параметрів є тільки два шляхи: розрахунок на підставі моделей теорії електромагнітного поля, або вимірювання за допомогою спеціальних вимірювальних приладів. Обидва шляхи мають рад суттєвих недоліків. Для розрахунку потрібно знати значення діелектричної та магнітної проникності матеріалів, з яких виготовлена лінія. Але ці значення найчастіше невідомі й визначаються дуже важко. Крім того, точне аналітичне розв'язання рівнянь теорії поля найчастіше є неможливим.

Експериментальне визначення параметрів потребує спеціалізованих складних вимірювальних приладів, які є досить дорогими. Крім того,

такі вимірювання є неможливими для вже прокладених ліній, що експлуатуються.

Тому розробка методів точного визначення первинних параметрів без використання теорії поля та спеціалізованих вимірювачів є актуальною практичною задачею.

### 1. Сучасний стан проблеми визначення параметрів ліній електропередач

В роботі [1] запропоновано метод визначення вторинних параметрів асиметричної трифазної лінії передачі. Для використання методу автори пропонують вимірювати струми та напруги як на вході, так і на виході кожної із ліній. Визначення параметрів виконується як розв'язок складної системи рівнянь (в її запису присутні обернені транспоновані матриці струмів та напруг). Методу розв'язання автори не пропонують. Крім того, цим методом знаходяться не первинні, а вторинні параметри ліній. Це є вадодою запропонованого в [1] методу, тому що, як відомо з теорії [2], взаємні індуктивності та ємності входять до уявної частини комплексів у вигляді суми окремих значень цих параметрів.

В статті [3] запропоновано метод визначення параметрів трьохпроводних повітряних ліній, заснований на одночасному вимірюванні фазових зсувів на початку та кінці лінії. Для того, щоб досягти достатньої точності вимірювань автори використовують дуже тривалий цикл – до одного тижня. Вимірювання проводились в робочому режимі лінії (напругою 400 kV), що потребує досить дорогого обладнання. Крім того, в статті так і не наведено математичних залежностей, за якими можна розрахувати параметри лінії. Однак, автори стверджують, що вони виміряли первинні параметри для прямої, оберненої та нульової послідовності фаз. Це виглядає дивним, адже первинні параметри залежать тільки від

© Д. А. Маєвський, О. М. Бесараб,  
О. М. Семенюг, О. Ю. Маєвська, 2019

конструкції та матеріалів лінії й не повинні залежати від її електричного режиму роботи. Водночас, автори наводять дуже цікаву таблицю (таблиця 1 в [3]), в якій наведено результати обчислень первинних параметрів за аналітичними співвідношеннями та результати моделювання в двох математичних пакетах – MatLab, LineProp та EMTP. Ця таблиця показує дуже великі розбіжності між отриманими результатами (до 20%), що свідчить про дуже невелику точність аналітичних методів розрахунку та математичного моделювання.

В роботі [4] наведено моделювання параметрів імпедансу для повітряної лінії передачі з двома проводами заземлення. Моделювання виконувалось з допомогою пакету ATP-EMTP [5]. В роботі описано тільки моделювання із метою отримання матриці імпедансу. З результатів роботи неможливо визначити увесь набір первинних параметрів, так як параметри провідності до матриці імпедансу не входять.

В статті [6] описано метод визначення параметрів трифазної лінії електропередачі на підставі осцилограм перехідних процесів в фазах ліній. Метод потребує складної вимірювальної апаратури, яка може фіксувати та передавати на комп'ютерну обробку графіки перехідних процесів. Крім того, для обробки треба використовувати спеціалізоване математичне забезпечення. Усе це робить запропонований метод малоприматним для практичного використання.

Автором статті [7] є той самий автор (Zhou-Xing Fu з Xi'an University of Science and Technology Xi'an, ShannXi, China), що очолює авторський колектив в роботі [4]. Обидві статті – [4] та [7] написані по матеріалам доповідей, які були представлені на 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). Стаття [7] фактично є продовженням роботи [4]. Зокрема в ній більш докладно викладено метод моделювання параметрів імпедансу. Але до роботи [7] цілком можна віднести усі зауваження, які було зроблено по роботі [4].

Таким чином, з проведеного аналізу публікацій можна зробити наступні проміжні висновки:

1. Визначення первинних параметрів ліній електропередач є актуальною науково-практичною проблемою.

2. На сьогодні ця проблема не має простого та дешевого способу розв'язання.

Тому мета статті, яка полягає в розробці та верифікації методу експериментального визначення первинних параметрів ліній електропередач є актуальною.

Розглянемо створення такого методу для двох випадків – коли лінією є звичайна двофазна лінія, та у випадку зв'язаної гальванічно та магнітно лінії із трьома провідниками.

## 2. Математична модель для визначення первинних параметрів одножильної екранованої лінії

Для побудови математичної моделі, яка дозволяє розрахувати первинні параметри лінії із одним провідником та екраном, скористаємось відомими рівняннями, які описують хвильові процеси в лініях з розподіленими параметрами:

$$\begin{cases} \dot{U} = \dot{U}_2 \cdot ch\gamma y + \dot{I}_2 Z_w \cdot sh\gamma y \\ \dot{I} = \frac{\dot{U}_2}{Z_w} \cdot sh\gamma y + \dot{I}_2 \cdot ch\gamma y \end{cases}$$

Ці рівняння описують закон зміни напруги та струму в точці лінії, яка розташована на відстані  $y$  від її кінця. При цьому вважаються відомими комплекси напруги та струму в кінці лінії ( $\dot{U}_2$  та  $\dot{I}_2$ ), а також вторинні параметри лінії – коефіцієнт розповсюдження

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (1)$$

та хвильовий опір

$$Z_w = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (2)$$

Для початку лінії з відомою довжиною  $l$  маємо систему:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cdot ch\gamma l + \dot{I}_2 Z_w \cdot sh\gamma l \\ \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{Z_w} \cdot sh\gamma l + \dot{I}_2 \cdot ch\gamma l \end{cases}$$

Розглянемо вхідний опір  $Z_{i0}$  цієї лінії у двох режимах: режимі холостого ходу та режимі короткого замикання в кінці. Для режиму холостого ходу, коли  $\dot{I}_2 = 0$ , маємо:

$$Z_{i0} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} = \frac{\dot{U}_2 \cdot ch\gamma l}{\frac{\dot{U}_2}{Z_w} \cdot sh\gamma l} = \frac{Z_w}{th\gamma l}$$

Для режиму короткого замикання, коли  $\dot{U}_2 = 0$ :

$$Z_{ik} = \frac{\dot{U}_{1k}}{\dot{I}_{1k}} = \frac{\dot{I}_2 Z_w \cdot sh\gamma l}{\dot{I}_2 \cdot ch\gamma l} = Z_w \cdot th\gamma l$$

Таким чином, якщо відомі комплекси вхідних опорів в режимі холостого ходу та короткого

замикання, є можливість розрахувати хвильовий опір та коефіцієнт розповсюдження із розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$\begin{cases} \underline{Z}_W = \underline{Z}_{i0} \\ th\gamma l \\ \underline{Z}_W \cdot th\gamma l = \underline{Z}_{ik} \end{cases}$$

Її розв'язком відносно  $\underline{Z}_W$  та  $th\gamma l$  є:

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\underline{Z}_{ik} \cdot \underline{Z}_{i0}}, \quad (3)$$

$$th\gamma l = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{ik}}{\underline{Z}_{i0}}}.$$

Тоді коефіцієнт розповсюдження  $\gamma$  може бути знайдений з останнього рівняння як:

$$\gamma = \frac{\operatorname{arcth} \sqrt{\frac{\underline{Z}_{ik}}{\underline{Z}_{i0}}}}{l}. \quad (4)$$

Таким чином, вторинні параметри лінії можуть бути знайденими із результатів експерименту за формулами (3) та (4). На підставі визначених вторинних параметрів можна розрахувати первинні параметри лінії.

Як відомо, вторинні параметри екранованої лінії з двома проводами двопроводної лінії (лінії, що містить тільки два проводи, або один провід та екран) зв'язані із первинними такими співвідношеннями:

$$\underline{Z}_W = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}, \quad (5)$$

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}. \quad (6)$$

Тоді, розв'язуючи систему

$$\begin{cases} \frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0} = \underline{Z}_W^2 \\ (R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0) = \gamma^2 \end{cases},$$

отримуємо:

$$R_0 + j\omega L_0 = \underline{Z}_W \cdot \gamma, \quad (7)$$

$$G_0 + j\omega C_0 = \frac{\gamma}{\underline{Z}_W}. \quad (8)$$

Таким чином, первинні параметри лінії із одним провідником та екраном можна визначити як дійсну та уявну частину комплексів (7) та (8).

### 3. Математична модель для визначення первинних параметрів двожильної екранованої лінії

Двожильна екранована лінія містить два провідники, об'єднані загальним екраном. Як показано в статті [8], в цьому випадку лінія має два різних хвильових опора та два коефіцієнти розповсюдження:

$$\underline{Z}_{W1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 - \underline{Y}_1}}, \quad (9)$$

$$\underline{Z}_{W2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1}{\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1}}, \quad (10)$$

$$\gamma_1 = \sqrt{(\underline{Z}_0 + \underline{Z}_1) \cdot (\underline{Y}_0 - \underline{Y}_1)}, \quad (11)$$

$$\gamma_2 = \sqrt{(\underline{Z}_0 - \underline{Z}_1) \cdot (\underline{Y}_0 + \underline{Y}_1)}. \quad (12)$$

В цих формулах:

$$\underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0, \underline{Z}_1 = j\omega M,$$

$$\underline{Y}_0 = (G_0 + G_{12}) + j\omega(C_0 + C_{12}),$$

$$\underline{Y}_1 = G_{12} + j\omega C_{12}.$$

Додаткові первинні параметри  $G_{12}$ ,  $C_{12}$ ,  $M$  – визначають відповідно провідність між проводами лінії, ємність між ними, та коефіцієнт взаємної індуктивності.

В тій же роботі (8) виведено рівняння для визначення струмів та напруг на початку лінії:

$$\begin{cases} 2\dot{U}_1 = (\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})ch\gamma_1 l + (\dot{U}_{12} - \dot{U}_{22})ch\gamma_2 l + \\ + \underline{Z}_{W1}(\dot{I}_{12} + \dot{I}_{22})sh\gamma_1 l + \underline{Z}_{W2}(\dot{I}_{12} - \dot{I}_{22})sh\gamma_2 l \\ 2\dot{U}_2 = (\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})ch\gamma_1 l + (\dot{U}_{22} - \dot{U}_{12})ch\gamma_2 l + \\ + \underline{Z}_{W1}(\dot{I}_{12} + \dot{I}_{22})sh\gamma_1 l + \underline{Z}_{W2}(\dot{I}_{22} - \dot{I}_{12})sh\gamma_2 l \\ 2\dot{I}_1 = (\dot{I}_{12} + \dot{I}_{22})ch\gamma_1 l + (\dot{I}_{12} - \dot{I}_{22})ch\gamma_2 l + \\ + \frac{1}{\underline{Z}_{W1}}(\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})sh\gamma_1 l + \frac{1}{\underline{Z}_{W2}}(\dot{U}_{12} - \dot{U}_{22})sh\gamma_2 l \\ 2\dot{I}_2 = (\dot{I}_{12} + \dot{I}_{22})ch\gamma_1 l + (\dot{I}_{22} - \dot{I}_{12})ch\gamma_2 l + \\ + \frac{1}{\underline{Z}_{W1}}(\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})sh\gamma_1 l + \frac{1}{\underline{Z}_{W2}}(\dot{U}_{22} - \dot{U}_{12})sh\gamma_2 l \end{cases}$$

В цій системі:  $\dot{I}_{12}, \dot{I}_{22}$  – струми, а  $\dot{U}_{12}, \dot{U}_{22}$  – напруги в кінці проводів довжиною  $l$ .

Аналогічно з розділом 2, розглянемо дослід холостого ходу одночасно між кожним проводом та екраном в кінці лінії. При досліді холостого ходу маємо:

$$\begin{cases} 2\dot{U}_1 = (\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})ch\gamma_1 l + (\dot{U}_{12} - \dot{U}_{22})ch\gamma_2 l \\ 2\dot{U}_2 = (\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})ch\gamma_1 l - (\dot{U}_{12} - \dot{U}_{22})ch\gamma_2 l \\ 2\dot{I}_1 = \frac{1}{Z_{W1}}(\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})sh\gamma_1 l + \frac{1}{Z_{W2}}(\dot{U}_{12} - \dot{U}_{22})sh\gamma_2 l \\ 2\dot{I}_2 = \frac{1}{Z_{W1}}(\dot{U}_{12} + \dot{U}_{22})sh\gamma_1 l - \frac{1}{Z_{W2}}(\dot{U}_{12} - \dot{U}_{22})sh\gamma_2 l \end{cases}$$

В цьому досліді експериментальному визначенню підлягають комплекси напруг на початку та в кінці кожного проводу лінії. Тоді з першого та другого рівнянь системи можна визначити гіперболічні косинуси  $ch\gamma_1 l$  та  $ch\gamma_2 l$ . Для цього позначимо відомі суми:  $\dot{U}_{2+} = \dot{U}_{12} + \dot{U}_{22}$ ,  $\dot{U}_{2-} = \dot{U}_{12} - \dot{U}_{22}$ . Тоді гіперболічні косинуси можна знайти як розв'язок системи:

$$\begin{cases} \dot{U}_{2+}ch\gamma_1 l + \dot{U}_{2-}ch\gamma_2 l = 2\dot{U}_{11} \\ \dot{U}_{2+}ch\gamma_1 l - \dot{U}_{2-}ch\gamma_2 l = 2\dot{U}_{21} \end{cases}$$

Розв'язуючи цю систему, отримуємо:

$$ch\gamma_1 l = \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}},$$

$$ch\gamma_2 l = \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2-}},$$

звідки можна розрахувати коефіцієнти розповсюдження  $\gamma_1$  та  $\gamma_2$ :

$$\gamma_1 = \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}}, \quad (13)$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2-}}. \quad (14)$$

Значення хвильових опорів  $Z_{W1}$  та  $Z_{W2}$  можна знайти з третього та четвертого рівнянь системи:

$$\begin{cases} \frac{1}{Z_{W1}}\dot{U}_{2+}sh\gamma_1 l + \frac{1}{Z_{W2}}\dot{U}_{2-}sh\gamma_2 l = 2\dot{I}_1 \\ \frac{1}{Z_{W1}}\dot{U}_{2+}sh\gamma_1 l - \frac{1}{Z_{W2}}\dot{U}_{2-}sh\gamma_2 l = 2\dot{I}_2 \end{cases} \quad (15)$$

В ній невідомими є обернені значення хвильових опорів, а гіперболічні синуси можна знайти із відомого співвідношення  $ch^2 x - sh^2 x = 1$ :

$$sh\gamma_1 l = \sqrt{ch\gamma_1 l - 1},$$

$$sh\gamma_2 l = \sqrt{ch\gamma_2 l - 1}.$$

Після підставлення цих виразів в систему (15) отримуємо її розв'язання хвильових опорів  $Z_{W1}$  та  $Z_{W2}$ :

$$Z_{W1} = \frac{\dot{U}_{2+}\sqrt{ch^2\gamma_1 l - 1}}{\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}},$$

$$Z_{W2} = \frac{\dot{U}_{2-}\sqrt{ch^2\gamma_2 l - 1}}{\dot{I}_{11} - \dot{I}_{21}}.$$

Тоді, враховуючи вирази (9) та (11), маємо систему:

$$\begin{cases} \frac{Z_0 + Z_1}{Y_0 - Y_1} = \left( \frac{\dot{U}_{2+}\sqrt{ch^2\gamma_1 l - 1}}{\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}} \right)^2 \\ (Z_0 + Z_1)(Y_0 - Y_1) = \left( \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}} \right)^2 \end{cases}$$

Розв'язуючи її відносно сум  $Z_0 + Z_1$  та  $Y_0 - Y_1$ , маємо:

$$Z_0 + Z_1 = \frac{\dot{U}_{2+}\sqrt{ch^2\gamma_1 l - 1}}{\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}},$$

$$Y_0 - Y_1 = \frac{\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}}{\dot{U}_{2+}\sqrt{ch^2\gamma_1 l - 1}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}}.$$

Із виразів (10) та (12) маємо систему:

$$\begin{cases} \frac{Z_0 - Z_1}{Y_0 + Y_1} = \left( \frac{\dot{U}_{2-}\sqrt{ch^2\gamma_2 l - 1}}{\dot{I}_{11} - \dot{I}_{21}} \right)^2 \\ (Z_0 - Z_1)(Y_0 + Y_1) = \left( \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2-}} \right)^2 \end{cases}$$

звідки:

$$Z_0 - Z_1 = \frac{\dot{U}_{2-}\sqrt{ch^2\gamma_2 l - 1}}{\dot{I}_{11} - \dot{I}_{21}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2-}},$$

$$Y_0 + Y_1 = \frac{\dot{I}_{11} - \dot{I}_{21}}{\dot{U}_{2-}\sqrt{ch^2\gamma_2 l - 1}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2-}}.$$

Позначимо для скорочення:

$$\frac{\dot{U}_{2+}\sqrt{ch^2\gamma_1 l - 1}}{\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}} = A_+,$$

$$\frac{\dot{U}_{2-}\sqrt{ch^2\gamma_2 l - 1}}{\dot{I}_{11} - \dot{I}_{21}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} - \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2-}} = A_-,$$

$$\frac{\dot{I}_{11} + \dot{I}_{21}}{\dot{U}_{2+}\sqrt{ch^2\gamma_1 l - 1}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arcch} \frac{\dot{U}_{11} + \dot{U}_{21}}{\dot{U}_{2+}} = B_+,$$

$$\frac{I_{11} - I_{21}}{U_{2-} \sqrt{ch^2 \gamma_2 l - 1}} \cdot \frac{1}{l} \operatorname{arccch} \frac{U_{11} - U_{21}}{U_{2-}} = B_-.$$

Тоді для визначення окремих складових хвильових опорів та коефіцієнтів розповсюдження можна скласти окремі системи рівнянь. Для комплексів повних опорів:

$$\begin{cases} Z_0 + Z_1 = A_+ \\ Z_0 - Z_1 = A_- \end{cases}.$$

Враховуючи, що  $Z_0 = R_0 + j\omega L_0$ , а  $Z_1 = j\omega M$ , маємо:

$$R_0 + j\omega L_0 = \frac{A_+ + A_-}{2}, \quad (16)$$

$$j\omega M = \frac{A_+ - A_-}{2}. \quad (17)$$

Аналогічно, для комплексів повних провідностей:

$$\begin{cases} Y_0 - Y_1 = B_+ \\ Y_0 + Y_1 = B_- \end{cases}.$$

Тоді, з врахуванням, що  $Y_1 = G_{12} + j\omega C_{12}$ , а  $Y_0 = (G_0 + G_{12}) + j\omega(C_0 + C_{12})$ , отримуємо:

$$G_{12} + j\omega C_{12} = \frac{B_- - B_+}{2}, \quad (18)$$

$$(G_0 + G_{12}) + j\omega(C_0 + C_{12}) = \frac{B_+ + B_-}{2}. \quad (19)$$

З виразів (16), (17), (18) та (19) можна отримати первинні параметри двожильної екранованої лінії.

#### 4. Визначення первинних параметрів трифазної екранованої лінії

Математична модель, яка описує хвильові процеси і трифазній лінії є складною системою з шести рівнянь. Але для визначення первинних параметрів трифазної лінії не обов'язково використовувати цю модель. Для цього достатньо провести експеримент таким же чином, як і для двожильної лінії, використавши будь-які два проводи трифазної лінії. Якщо лінія не є симетричною, то описаний в п. 2 експеримент треба провести для кожної пари проводів.

#### 5. Експериментальне визначення первинних параметрів ліній

Для перевірки отриманих в роботі результатів було проведено експеримент по визначенню первинних параметрів кабелю КВББШВ 4x1,5 довжиною 3010 метрів. Відповідно до викладеного в п. 3, на вхід двох провідників кабелю по-

давалася змінна синусоїдально напруга частотою 50 Hz від низьковольтного генератора синусоїдальних сигналів. Вимірювалися діючі значення струмів та напруги на вході кабелю, а також зсуви за фазою між струмами та напругами. В режимі холостого ходу вимірюно напруги на виході цих же двох провідників. За нульове значення фази в цьому вимірюванні було прийнято фазу напруги на вході кабелю. Результати вимірювань представлено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати вимірювань

Параметр	Діюче значення	Зсув за фазою, град.
Вхід кабелю		
$U_{11}$	8 V	0
$U_{21}$	8 V	0
$I_{11}$	0,47 mA	-15
$I_{21}$	0,39 mA	-18
Вихід кабелю		
$U_{12}$	7,29 V	76
$U_{22}$	7,63 V	69

На підставі цих даних за приведеними в п. 3 формулами були розраховані первинні параметри кабелю, представлені в таблиці 2.

Таблиця 2.

Розраховані первинні параметри кабелю

Параметр	Значення
$R_0, \Omega/m$	0,0127
$L_0, H/m$	$1,78 \cdot 10^{-5}$
$C_0, F/m$	$1,35 \cdot 10^{-9}$
$M, H/m$	$1,34 \cdot 10^{-6}$
$G_0, S/m$	$3,76 \cdot 10^{-9}$
$G_{12}, S/m$	$3,5 \cdot 10^{-9}$

Як витікає із аналізу, який проведено в п. 1, єдиним достовірним способом перевірки правильності визначення параметрів є експеримент. Тому для перевірки з цим же кабелем було проведено експеримент, подібний до того, який описано в роботі [9]. Схема експерименту наведена на рис. 1.

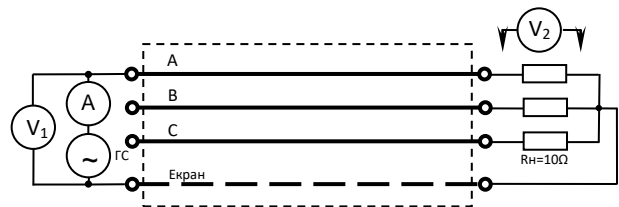


Рис. 1. Схема експерименту

На один з провідників кабелю (умовно – фаза А) від генератора сигналів синусоїдальної форми подавалася напруга з діючим значенням 8V

(активний провідник). Вимірювання проводилися для двох значень частоти генератора – 50 Hz та 100 Hz. Два інші провідники (умовно – фаза В та С) не підімкнено (пасивні провідники).

Вимірювалось діюче значення напруги в кінці активного та пасивного провідників ( $U_{2A}, U_{2B}, U_{2C}$ ) в режимі симетричного активного навантаження 10  $\Omega$ . Також вимірювалось діюче значення струму на вході активного провідника ( $I_{1A}$ ).

Результати вимірювань порівнювалися із розрахунковими даними, отриманими на підставі математичної моделі, викладеної в роботі [8]. В якості первинних параметрів в моделі використано параметри із таблиці 2.

Результати експериментів та розрахунку представлено в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3

## Порівняння результатів для частоти 50 Hz

Параметр	Експерим.	Розрах.	Відхилення
$U_{2A}, V$	0,245	0,256	4,5%
$U_{2A}, V$	0,017	0,0176	3,5%
$U_{2A}, V$	0,017	0,0175	2,7%
$I_{1A}, mA$	21,2	22,23	4,9%

Таблиця 3

## Порівняння результатів для частоти 100 Hz

Параметр	Експерим.	Розрах.	Відхилення
$U_{2A}, V$	0,244	0,253	3,7%
$U_{2A}, V$	0,018	0,0186	3,3%
$U_{2A}, V$	0,019	0,0186	2,1%
$I_{1A}, mA$	21,1	22,19	0,45%

Як можна бачити із таблиць 2 та 3, експериментальні та розрахункові дані різняться не більше, ніж на 5 відсотків. Це свідчить про те, що первинні параметри кабелю були визначені вірно й з точністю 5% відповідають дійсності. Похибка може виникнути за рахунок похибки вимірювальних приладів, які було задіяно в експерименті.

## Висновки

В роботі було виведено рівняння для експериментального визначення параметрів різного типу ліній електропередач. Ці рівняння базуються на теоретичній електротехніці й не залежать від конкретного конструктивного виконання ліній. Тому можна стверджувати, що запропонований в статті спосіб визначення первинних параметрів ліній електропередач є універсальним.

Напрямами подальших досліджень може бути вивчення зміни таких первинних параметрів, як власні та взаємні індуктивності та ємності від частоти. Така залежність повинна існувати, тому що діелектрична та магнітна проникність матеріалів, з котрих виготовлено лінію електро-

передачі змінюється в залежності від частоти електромагнітної енергії.

## Список використаної літератури

1. Yin, J. An online measuring method of impedance parameters of asymmetric transmission lines [Text] / J. Yin, J. Zhao, X. Wang, H. Liu, Y. Gao // 2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). – Changsha, 2016. – p. 2241–2245. – doi: 10.1109/FSKD.2016.7603530
2. Yang, Z. Analysis of characteristic impedance of strip double line [Text] / Zhengguang Yang, Donglin Su, Lv, S. // 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. – Vol. 1. – Beijing, 2005. – p. 95–98. – doi: 10.1109/MAPE.2005.1617856
3. Dan, A. M. Estimation of transmission line parameters using wide-area measurement method / A. M. Dan, D. Raisz [Text] // 2011 IEEE Trondheim PowerTech. – Trondheim, 2011. – pp. 1–6. – doi: 10.1109/PTC.2011.6019406
4. Fu, Z. Calculation of Line Parameters in Different Grounding Modes of Double Earth Wire [Text] / Z. Fu, J. Guo, Y. Li // 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). – Xi'an, 2016. – p. 148–151. – doi: 10.1109/IS3C.2016.48
5. ATP-EMTP [Електронний ресурс]: [Веб-сайт]. – Електронні дані. – San Francisco, CA: Scribd 2019. – Режим доступу: <https://ru.scribd.com/doc/312396735/ATP-EMTP> (дата звернення 17.02.2019) – Назва з екрана.
6. Tangsheng, Xun. Study on online calculation method of transmission line parameters [Text] / Xun Tangsheng, Wang Li, Zhang Song, Zhang Linlin, Kong Jin, Cong Wei // 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). – Birmingham, UK, 2012. – pp. 1–4. – doi: 10.1049/cp.2012.0120
7. Fu, Z. The Calculation of 750kV Line Parameters Based on ATP-EMTP Simulation [Text] / Z. Fu, D. Ju, Y. Li // 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). – Xi'an, 2016. – p. 160–163. – doi: 10.1109/IS3C.2016.51
8. Маевский, Д. А. Математическая модель системы связанных полосковых линий [Текст] / Д. А. Маевский // Электромашиностроение и электрооборудование. – № 65. – К.: Техніка, 2007. – с. 64–67.
9. Масвський, Д. А. Експериментальні дослідження взаємних впливів між проводами трифазного кабелю [Текст] / Д. А. Маевський, О. М.

Семенюг, О. В. Яковлев, О. П. Морозов, О. О. Топузанов // Электротехнические и компьютерные системы. – № 27 (103). – Одеса: Астропринт, 2018. – С. 91–96.

### References

1. Yin, J., Zhao, J., Wang, X., Liu, H. and Gao, Y. (2016). An online measuring method of impedance parameters of asymmetric transmission lines. 2016 12th International Conference on Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (ICNC-FSKD). p. 2241–2245.
2. Zhengguang Yang, Donglin Su and Lv, S. (2005). Analysis of characteristic impedance of strip double line. 2005 IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications. p. 95–98.
3. Dan, A. and Raisz, D. (2011). Estimation of transmission line parameters using wide-area measurement method. 2011 IEEE Trondheim PowerTech. pp. 1–6.
4. Fu, Z., Guo, J. and Li, Y. (2016). Calculation of Line Parameters in Different Grounding Modes of Double Earth Wire. 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). p. 148–151.
5. Scribd. (2019). ATP-EMTP [online] Available at: <https://ru.scribd.com/doc/312396735/ATP-EMTP> [Accessed 17 Feb. 2019].
6. Xun Tangsheng, Wang Li, Zhang Song, Zhang Linlin, Kong Jin and Cong Wei (2012). Study on online calculation method of transmission line parameters. 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). pp. 1–4.
7. Fu, Z., Ju, D. and Li, Y. (2016). The Calculation of 750kV Line Parameters Based on ATP-EMTP Simulation. 2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). p. 160–163.
8. Maevsky, D. A. (2007), “Mathematical model of a system of connected strip lines”, [Математическая модель системы связанных полосковых линий], *Electrical engineering and electrical equipment* No. 65, Tekhnika, Kyiv, p. 64–67, (in Russian).
9. Maevsky, D.A., Semenug, O.M., Yakovlev, O.V., Morozov, O.P., Topuzanov, O.O. (2018), “Experimental investigations of mutual influences between wires of a three-phase cable” [Експериментальні дослідження взаємних впливів між провідниками трифазного кабелю], *Electrotechnic and computer systems* No. 27(103), Astroprint, Odessa, p. 91–96, (in Ukrainian).

## EXPERIMENTAL DEFINITION OF PRIMARY CONSTANTS OF THE ELECTRICAL TRANSMISSION LINES

D. A. Maevsky<sup>1</sup>, O. M. Besarab<sup>1</sup>, O. M. Semenug<sup>2</sup>, O. J. Maevskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Odessa National Polytechnic University

<sup>2</sup>Engineering Company “S-Engineering”

**Abstract.** The article describes the method of experimental determination of the primary constants of the lines of transmission of electrical energy. Analysis of the problem on the basis of modern scientific publications has been performed. It is shown that the experiment is the only reliable way to determine the constants. The use of mathematical models of field theory is impossible, since the magnetic and dielectric constant of line materials are never known for sure. The proposed method is based on accurate mathematical models of the propagation of electromagnetic waves in lines with distributed parameters. Mathematical models for a shielded line with one wire and with two wires are used. Mathematical models are obtained on the basis of Kirchhoff's laws for lines with distributed parameters and are accurate. To perform the measurements, only the simplest measuring devices are used — an ammeter, a voltmeter, and a phase difference meter. An oscilloscope can be used as a phase difference meter. The experimental data for stranded armored cable are given. Based on these data, the calculation of the primary constants. Verification of the primary constants obtained from the experiment was performed. For verification, the substitution of constants into a mathematical model of the propagation of electromagnetic signals in lines with equal parameters was used. According to this model, voltages and currents are calculated at the beginning and at the end of the cable. Comparison of the obtained data with experimental data. The error in determining the constants was no more than 5%. The accuracy achieved is sufficient for most practical cases and can be improved by increasing the measurement accuracy. The proposed method for determining the primary constants is universal and can be applied to all types of transmission lines of electrical energy. The article identifies possible areas for further research.

**Keywords:** *Specific parameters, constant parameters, resistivity, specific inductance, specific capacitance, specific conductivity, power line, cable line*

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Д. А. Маевский<sup>1</sup>, А. Н. Бесараб<sup>1</sup>, А. Н. Семенюг<sup>2</sup>, Е. Ю. Маевская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Одесский национальный политехнический университет

<sup>2</sup>Инжиниринговая компания «С-Инжиниринг»

**Аннотация.** В статье предложен способ экспериментального определения первичных параметров линий электропередач. Основой метода являются математические модели линии с распределенными параметрами. Параметры определяются с использованием самых распространенных измерительных приборов - амперметра, вольтметра и фазометра. Предложенный метод использовать для всех типов линий электропередач. Выполнена экспериментальная проверка найденных первичных параметров..

**Ключевые слова:** Удельные параметры, первичные параметры, удельное сопротивление, удельная индуктивность, удельная емкость, удельная проводимость, линия электропередачи, кабельная линия.

Отримано 23.02.2019



**Маєвський Дмитро Андрійович**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: Dmitry.A.Maevsky@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

**Dmitry Maevsky**, Dr. of Science, Professor, Head of the Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, , E-mail: Dmitry.A.Maevsky@gmail.com, тел. +38-048-705-84-54

**ORCID ID:** 0000-0003-0666-6199



**Бесараб Олександр Миколайович**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: al\_besarab@ukr.net, тел. +38-048-705-8-567

**Alexander Besarab**, Phd, Associate Professor, Head of the department of electric power supply and energy management, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: al\_besarab@ukr.net.

**ORCID ID:** 0000-0003-4170-8294



**Семенюг Олександр Миколайович**, зам. генерального директора по науці ООО «С-Інжиніринг». ул. Н. Боровського, 28, корп. 47, Одеса, Україна, E-mail: Aleksander.semenyug@se.ua, тел. +38-048-730-57-31

**Aleksandr Semenyug**, Deputy CEO for Science, S-Engineering LLC, 28 Nickolaya Borovskogo Str., block 47, Odessa, Ukraine, , E-mail: Aleksander.semenyug@se.ua, тел. +38-048-730-57-31

**ORCID ID:** 0000-0003-1198-2014



**Маєвська Олена Юрївна**, кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичних основ і загальної електротехніки Одеського національного політехнічного університету. Просп. Шевченка, 1, Одеса, Україна, E-mail: e.j.maevskaya@opu.ua тел. +38-048-705-84-54

**Elena Maevskaya**, Phd, Associate Professor, Department of theoretical foundations and general electrical engineering, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: e.j.maevskaya@opu.ua тел. +38-048-705-84-54

**ORCID ID:** 0000-0001-6297-4255