

**РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ 0,4...10 КВ
ЯК СЕРЕДОВИЩА ПЕРЕДАЧІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ**

О. В. Тимохін, А. О. Тимохіна, Д. В. Настенко

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: tymokhin@ukr.net

Розроблено підхід до розрахунку первинних параметрів лінії розподільної електричної мережі (РЕМ) як лінії із розподіленими параметрами шляхом чисельного вирішення рівнянь Максвелла для просторових моделей кабелів РЕМ із врахуванням електричних та магнітних властивостей матеріалів із яких вони побудовані. Для перевірки запропонованого підходу було побудовано геометричну модель силового кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 та отримані результати розподілу електричного та магнітного полів в широкому частотному діапазоні. На основі побудованої моделі отримано поперечні та повздовжні кілометричні параметри кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 і на основі них вхідний хвильовий опір кабелю, та його стала розповсюдження в широкому частотному діапазоні. Проведено порівняльний аналіз параметрів, отриманих шляхом моделювання і відомих експериментальних параметрів для кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4, який показав можливість використання запропонованого підходу для визначення поперечних та повздовжніх кілометричних параметрів лінії РЕМ довільної конфігурації.

Ключові слова: лінії зв'язку, електричні мережі, метод скінчених елементів, широкосмугові сигнали.

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4...10 КВ
КАК СРЕДЫ ПЕРЕДАЧИ ШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ**

А. В. Тимохин, А. А. Тимохина, Д. В. Настенко

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: tymokhin@ukr.net

Разработан подход к расчету первичных параметров линии распределительных электрических сетей (РЭС) как линии с распределенными параметрами путем численного решения уравнений Максвелла для пространственных моделей кабелей РЭС с учетом электрической и магнитных свойств материалов из которых они созданы. Для проверки предложенного подхода построена геометрическая модель силового кабеля ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 и получены результаты распределения электрического и магнитного полей в широком частотном диапазоне. На основании построенной модели получены поперечные и продольные параметры кабеля ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 и на их основе входное волновое сопротивление кабеля и постоянная распространения в широком частотном диапазоне. Проведен сравнительный анализ параметров, полученных путем моделирования и известных экспериментальных параметров для кабеля ГРШЕ 3x35+1x10+3x4, который показал возможность использования предложенного подхода для определения поперечных и продольных километрических параметров линий РЭС произвольной конфигурации.

Ключевые слова: линии связи, электрические сети, метод конечных элементов, широкополосные сигналы.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів є складною багатопараметровою задачею, що ґрунтується на телеграфних рівняннях для багатопрвідної лінії [1, 2, 3, 4]. Разом із тим слід зазначити, що у зв'язку із складністю отримання параметрів системи телеграфних рівнянь для інженерної практики розроблені наближені методи моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів.

Метод моделювання РЕМ як середовища передачі широкосмугових сигналів на основі телеграфних рівняннях для багатопрвідної лінії є точним методом моделювання РЕМ як середовища передачі сигналів. Для його використання РЕМ представляється у вигляді багатопрвідної лінії, що складається з n проводів і представлена на рис. 1.

Ця модель описується системою телеграфних рівнянь, яка в загальному вигляді представлена як [1, 2, 4]:

$$\begin{cases} -\frac{d^2}{dx^2} \mathbf{U} = \mathbf{P}\mathbf{U} \\ -\frac{d^2}{dx^2} \mathbf{I} = \mathbf{P}^T \mathbf{I} \end{cases} \quad (1)$$

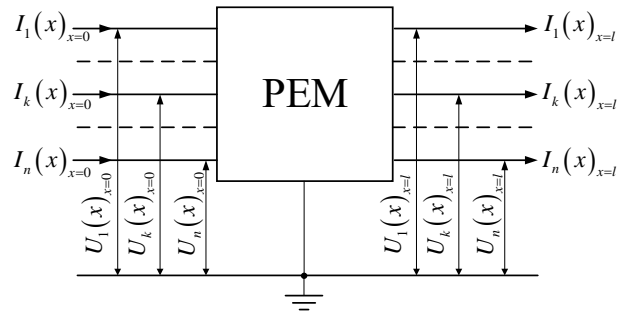


Рисунок 1 – Модель розподільної електричної мережі у вигляді $2n+1$ полюсника

Розв'язок рівняння (1) має вигляд:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_s &= e^{-\gamma x} \mathbf{B}_{1s} + e^{\gamma x} \mathbf{B}_{2s} = \mathbf{U}_{s.пад} + \mathbf{U}_{s.відб} \\ \mathbf{Z}_{x0} \mathbf{I}_s &= \mathbf{U}_{s.пад} + \mathbf{U}_{s.відб} = \mathbf{Z}_e \mathbf{I}_{s.пад} + \mathbf{Z}_e \mathbf{I}_{s.відб} \end{aligned} \quad (2)$$

де γ – матриця коефіцієнтів розповсюдження; \mathbf{B}_{1s} і \mathbf{B}_{2s} – стовпцеві матриці з відповідними постійними

інтегрування; $\mathbf{U}_{s.пад}$ і $\mathbf{U}_{s.відб}$ – відповідно матриці падаючої та відбитої хвиль напруги; $\mathbf{I}_{s.пад}$ і $\mathbf{I}_{s.відб}$ – відповідно матриці падаючої та відбитої хвиль струму; \mathbf{Z}_{xg} – матриця модальних хвильових опорів [1].

В роботі [1] показано можливість перетворення моделі такої багатопровідної лінії до вигляду, який представлено на рис. 2.

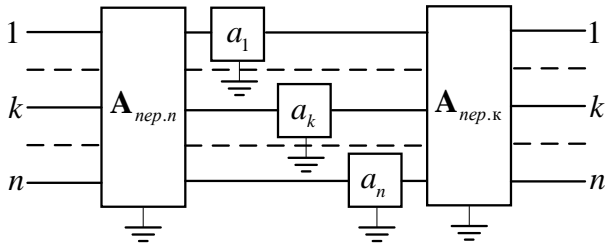


Рисунок 2 – Модель розподільної електричної мережі у вигляді $2n+1$ полюсника

Такий перехід дозволяє розглядати кожний окремий фазний провід лінії як окремий 4-х полюсник, після чого повернутися назад до повної схеми $2n+1$ полюсника.

Для спрощення розрахунків реальні трифазні повітряні лінії приводять до еквівалентної симетричної лінії. Спрощення розрахунків при симетрії проводів пояснюється виникненням у такій лінії при розповсюдженні електромагнітної енергії ряду хвиль із однаковою постійною поширення. Розв'язок диференціальних рівнянь для еквівалентної симетричної лінії дозволяє обмежитися визначенням залежностей тільки для двох хвиль, земляної (три проводи – земля) і міжфазної (провід - два проводи) [1].

В [5] показано, що для моделювання РЕМ в широкому частотному діапазоні ділянки РЕМ представляються у вигляді мостової схеми заміщення (рис. 3)

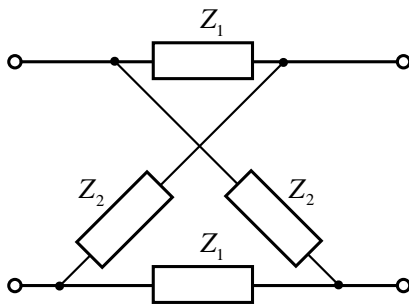


Рисунок 3 – Мостова схема заміщення ділянок РЕМ де Z_1, Z_2 – повздовжній та поперечний опори ділянки РЕМ

Розбиття РЕМ на ділянки пропонується здійснювати на основі сталої розповсюдження $|\gamma|$ за залежністю:

$$l_{max} = \frac{1}{|\gamma|} \quad (3)$$

Відомо, що в загальному вигляді для ліній із розподіленими параметрами стала розповсюдження γ та хвильовий опір Z_{xg} визначається як

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (4)$$

$$Z_{xg} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

При цьому залишається проблема визначення первинних параметрів ліній РЕМ як ліній із розподіленими параметрами.

Мета роботи – розробити підхід до розрахунку первинних параметрів ліній РЕМ як ліній із розподіленими параметрами на основі просторових моделей ліній РЕМ із врахуванням електричних та магнітних властивостей матеріалів ліній РЕМ.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Вирішити поставлену задачу в загальному вигляді можна шляхом розв'язання рівнянь Максвелла для електричного та магнітного полів для просторових моделей ліній РЕМ, який дає розподіл векторів напруженості магнітного та електричного полів у просторі.

При цьому відомо, що енергії магнітного та електричного полів пов'язані із електричними параметрами провідника із струмом як [6]

$$W_{m.сеп} = \frac{\mu}{4} \int_S \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* ds, \quad W_{m.сеп} = \frac{L \cdot I_{амл}^2}{2} \quad (5)$$

$$W_{el.сеп} = \frac{\varepsilon}{4} \int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* ds, \quad W_{el.сеп} = \frac{C \cdot V_{амл}^2}{2}$$

Відповідно можна отримати, що

$$L = \frac{\mu}{I_{амл}^2} \int_S \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* ds$$

$$C = \frac{\varepsilon}{V_{амл}^2} \int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* ds \quad (6)$$

де \mathbf{H}, \mathbf{E} – комплексні вектори напруженості магнітного та електричного полів, S – деяка поверхня розподілу електричного та магнітного полів, μ, ε – магнітна та електрична проникність середовища, в якому існують електричне та магнітне поле.

Згідно з [6] потужність, що розсіюється одиницею довжини провідника при кінцевій провідності у металевих провідників та втрати у діелектрику навколишнього середовища визначається як

$$P_{пров} = \frac{R_s}{2} \int_S \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* dl, \quad P_{пров} = \frac{R \cdot I_{амл}^2}{2} \quad (7)$$

$$P_{діел} = \frac{\omega \varepsilon''}{2} \int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* ds, \quad P_{діел} = \frac{G \cdot V_{амл}^2}{2}$$

де $R_s = \frac{1}{\sigma \delta_s}$ – поверхневий опір лінії передачі; δ_s – товщина скін шару; σ – провідність речовини провідника; $\varepsilon'' = \varepsilon' \operatorname{tg} \delta$ – уявна частина діелектричної проникності діелектрика; δ – кут діелектричних втрат діелектрика; C – контур інтегрування, що охоплює провідник лінії передачі; S – деяка поверхня розподілу електричного та магнітного полів.

Тоді питомий опір та поперечна провідність можна отримати як

$$R = \frac{1}{I_{амл}^2 \cdot \sigma \cdot \delta_s} \int_C \mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^* dl, \quad (8)$$

$$G = \frac{\omega \varepsilon''}{V_{амл}^2} \int_S \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* ds,$$

Таким чином для отримання параметрів телеграфних рівнянь для лінії передачі довільної конструкції достатньо знати електричні параметри матеріалів з яких побудована лінія, параметри навколишнього середовища та зовнішніх діелектричних матеріалів та розв'язати задачу розподілу магнітних та електричних полів, що створюються у провіднику зовнішніми джерелами.

Розв'язання задачі розподілу магнітних та електричних полів є складною нелінійною задачею, що суттєво залежить від геометричної топології та взаємного розташування елементів, що входять в область розподілу магнітних та електричних полів. В загальному вигляді дана задача не має аналітичного розв'язку і для її розв'язку використовують чисельні методи, зокрема метод скінченних елементів [7].

Суть метода полягає у розбитті області в якій розв'язується задача розподілу магнітних та електричних полів на елементарні області, для яких визначені аналітичні апроксимуючі розв'язки поставленої задачі в загальному вигляді. Частинним розв'язком є визначення коефіцієнтів апроксимуючих функцій, які описують розподіл магнітних та електричних полів у елементарних областях за умов рівності їх значень на межах цих областей [7].

Якість розв'язку залежить від форм областей, на які розбивається вся область розв'язку та апроксимуючих функцій для елементарних областей розбиття. Розв'язання таких задач виконується, як правило, у спеціалізованих програмних математичних пакетах, таких як COMSOL Multiphysics [8].

Для оцінки правильності застосування запропонованого підходу проведено розрахунки параметрів для елементів ПЕМ, для яких існують параметри, отримані експериментально. В якості дослідного об'єкта обрано силовий кабель ГРШЕ 3x35+1x10+3x4, для якого в [5] експериментальним шляхом отримано параметри як для лінії із розподіленими параметрами.

Дослідження розподілу електричного потенціалу проводились шляхом моделювання подачі постійної напруги амплітудою 1В між фазами В та С, а щільність магнітного потоку шляхом моделювання струму амплітудою 1А по фазам В та С. Моделювання виконувалося у програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a. Розроблена модель представлена на рис. 4.

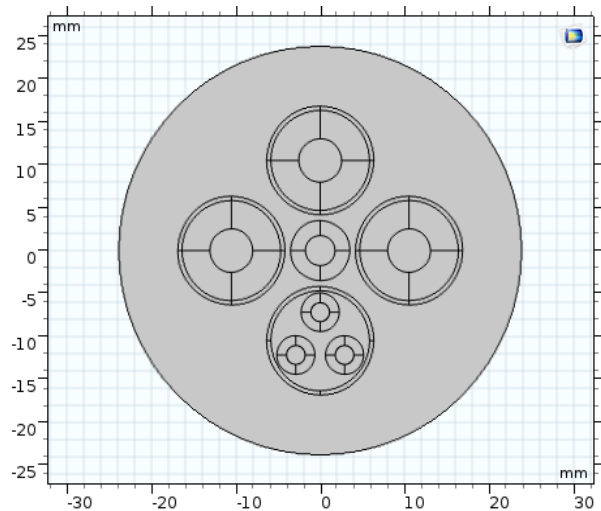


Рисунок 4 – Зовнішній вигляд геометричного розташування складових кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 в програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a

Для застосування методу скінченних елементів геометрична модель кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 розбивається на області, що представлено на рис. 5.

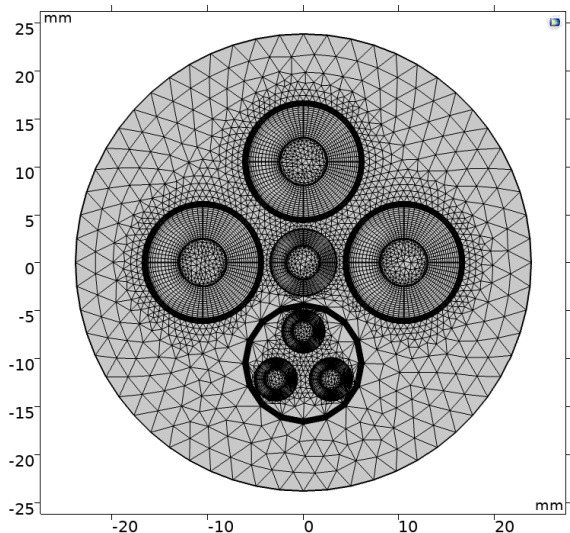


Рисунок 5 – Зовнішній вигляд розбиття геометричної моделі кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 на елементарні області в програмному комплексі COMSOL Multiphysics 5.3a

Для дослідної моделі розраховано розподіл електричного потенціалу та щільності магнітного потоку, які представлені на рис. 6 та на рис. 7.

На підставі отриманого розв'язку та виразів (6) та (8) отримано поперечні та повздовжні кілометричні параметри кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4, а також вхідний хвильовий опір кабелю, та його стала розповсюдження, які представлені в табл. 1

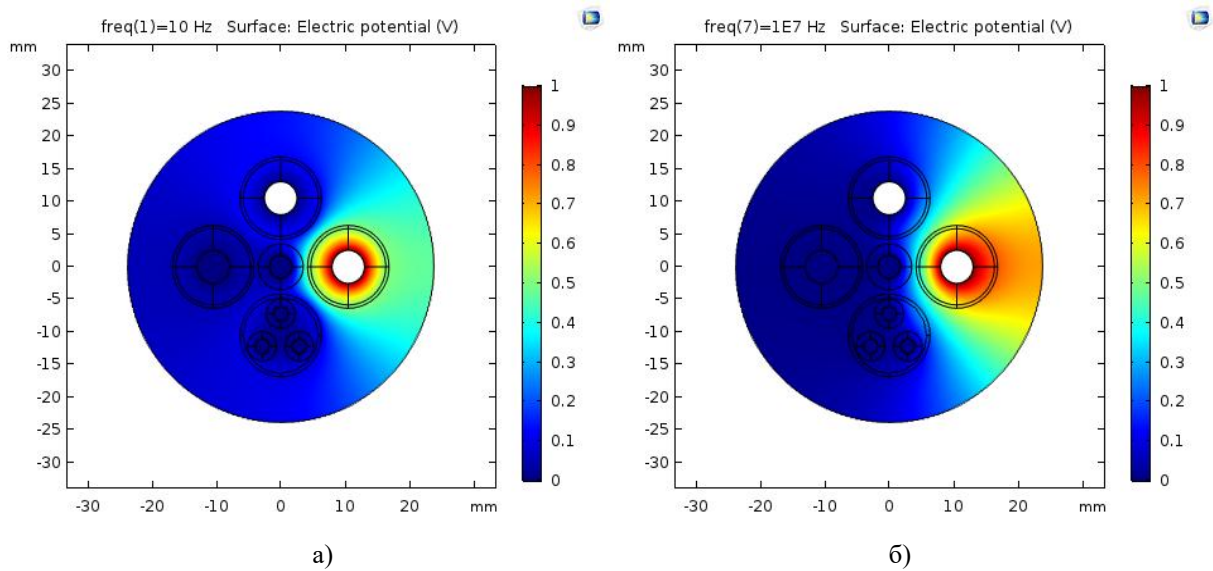


Рисунок 6 – Геометричний розподіл електричного потенціалу в кабелі ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 для частот 10 Гц (а) та 10 МГц (б)

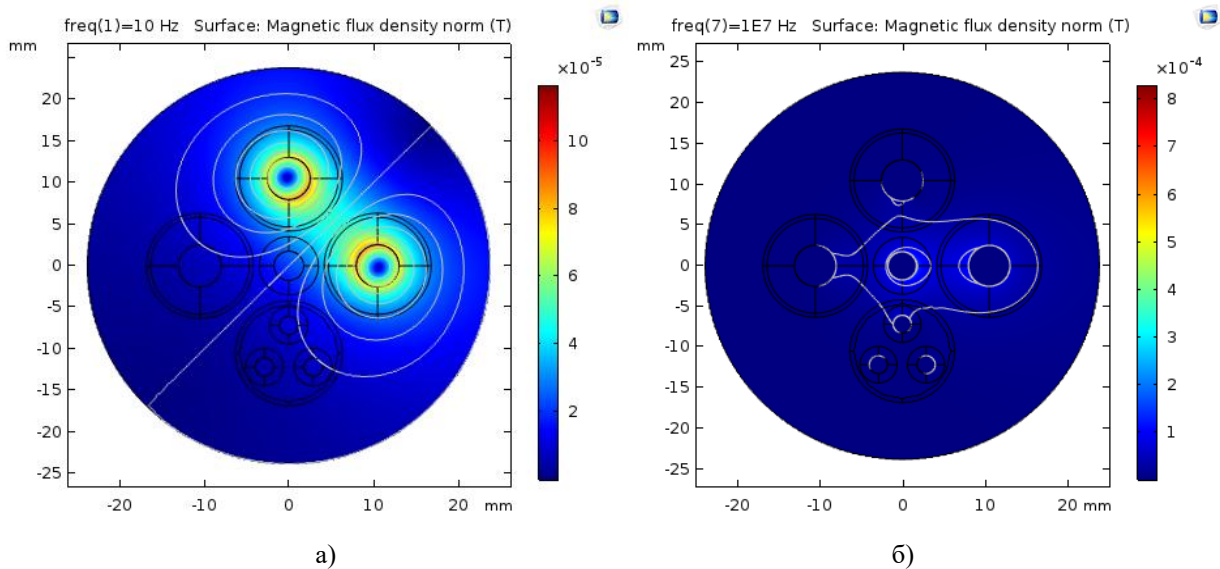


Рисунок 7 – Геометричний розподіл електричного потенціалу в кабелі ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 для частот 10 Гц (а) та 10 МГц (б)

Таблиця 1 – Повздовжні параметри кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4.

Частота, кГц	Повздовжній опір, Ом/км	Повздовжня індуктивність, мГн/км	Поперечна провідність, мСм/км	Поперечна ємність, мкФ/км	Z_{oc} , Ом/км	γ
0,01	2,565	0,700	$3,491 \cdot 10^{-7}$	0,225	$2,985 \cdot 10^{-4} + 3,04 \cdot 10^{-4}j$	429,657-422,343j
0,1	2,574	0,695	$4,067 \cdot 10^{-6}$	0,225	$8,765 \cdot 10^{-4} + 0,001j$	146,816-123,996j
1	2,709	0,665	$3,759 \cdot 10^{-4}$	0,225	0,002+0,006j	80,465-23,808j
10	5,016	0,613	0,375	0,225	0,003+0,052j	73,952-4,700j
100	14,475	0,567	3,697	0,224	0,017+0,501j	71,096-0,512j
1000	44,364	0,552	151,783	0,197	0,313+4,634j	74,511+4,08j
10000	147,220	0,547	533,134	0,174	1,149+43,287j	79,307+1,765j

Аналіз отриманих результатів проводився шляхом порівняння експериментально отриманих параметрів кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 та параметрів, отриманих в результаті моделювання [9].

Слід зазначити, що в процесі розв'язання задач з визначення розподілу електричного потенціалу та щільності магнітного потоку в кабелі, виникали певні труднощі внаслідок проблем із збіжністю чисельних методів по розрахунку систем рівнянь Максвелла, що пов'язано із коректним врахуванням скін-ефекту на частотах вище 1 МГц [9].

Аналіз отриманих результатів показав, що із зростанням частоти повздовжній опір суттєво зростає із частотою, починаючи із 100 кГц від 14,475 Ом до 147,22 Ом на частоті 10 МГц. При цьому повздовжня індуктивність навпаки падає, хоч і не так суттєво від 0,665 мГн на частоті 1кГц до 0,547 мГн на частоті 10 МГц. Ці результати обумовлені дією скін-ефекту [9, 10].

Згідно з [5] поперечні ємності жил кабелю ГРШЕ 3x35+1x10+3x4 знаходиться в межах 0,223-0,241 мкФ/км. В результаті моделювання отримана повздовжня ємність кабелю 0,225 мкФ/км на частотах до 100 кГц, що відповідає експериментальним даним, та підтверджує коректність розрахунку [9].

Проведені дослідження показали сталість поперечної ємності на частотах до 100 кГц та її зниження на частотах більше 100 кГц до 0,174 мкФ/км (на 23%) на частоті 10 МГц, що може бути пов'язано із перерозподілом поля в об'ємі кабелю складної конструкції. Повздовжня провідність навпаки суттєво зростає з частотою від $3,491 \cdot 10^{-7}$ См/км на частоті 10 Гц до 533,134 См/км на частоті 10 МГц, у зв'язку із її прямою залежністю від частоти [9, 10].

Проведені дослідження показали можливість визначення первинних параметрів РЕМ як лінії із розподіленими параметрами шляхом чисельного вирішення рівнянь Максвелла для просторової моделі кабелів РЕМ із врахуванням електричних та магнітних властивостей матеріалів із яких вони побудовані [9].

ВИСНОВКИ. Проведені дослідження показали сталість поперечної ємності на частотах до 100 кГц та її зниження на частотах більше 100 кГц до 0,174 мкФ/км (на 23%) на частоті 10 мГц, що може бути пов'язано із перерозподілом поля в об'ємі кабелю складної конструкції. Повздовжня провідність навпаки суттєво зростає з частотою від $3,491 \cdot 10^{-7}$ см/км на частоті 10 гц до 533,134 см/км на частоті 10 мГц, у зв'язку із її прямою залежністю від частоти [10].

CALCULATING THE PARAMETERS OF ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORKS 0,4... 10 KV AS MEDIUM TRANSMISSIONS OF BROADBAND SIGNALS

O. Tymokhin, A. Tymokhina, D. Nastencko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
prosp. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine, e-mail: tymokhin@ukr.net

Purpose. Develop an approach to the calculation of the primary parameters for the line of electric distribution networks (DEN) as a line with distributed parameters for spatial 3D models of DEN lines with considering electric and magnetic properties of the lines. Checking the approach by comparing the result of calculation based on 3D models of DEN and experimental measured parameters of DEN. **Methodology.** Maxwell's equation was used to solve the problem. Article presents the way to calculate parameters of electric networks elements for power line communication

Проведені дослідження показали можливість визначення первинних параметрів РЕМ довільної конфігурації як лінії із розподіленими параметрами шляхом чисельного вирішення рівнянь Максвелла для просторових моделей кабелів РЕМ із врахуванням електричних та магнітних властивостей матеріалів із яких вони побудовані.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костенко М. В., Перельман Л. М., Шкарин Ю. П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Издательство «Энергия», 1973. 272с.

2. Смирнов Б. В., Ильин А. А. Передача сигналов по распределительным электрическим сетям.: Основы теории и расчета. К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1963. 423с.

3. Тимохін О. В. Підвищення ефективності передачі інформації по розподільних електричних мережах 0,4-10 кВ. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2014. Т. 1. С. 66–69.

4. Яндудський А. С., Тимохін А. В. Оценка влияния характеристик распределительных электрических сетей 0,4...20кВ на процесс распространения широкополосных сигналов в распределительных электрических сетях. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2007. Т. 1. № 2. С. 167–171.

5. Огороднійчук І. П., Остроухов В. Д. Розрахунок каналів телемеханіки по розподільних електричних мережах. К.: Видавництво «Техніка», 1972. 136 с.

6. Лялин К. С., Приходько Д. В. Электродинамика СВЧ: Учебное пособие. М.: МИТЭ, 2009. Т.2. 192с.

7. Метод конечных элементов, [Електронний ресурс]. – 24.03.2020. – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов (дата звернення: 28.10.2020).

8. COMSOL Multiphysics, [Електронний ресурс]. – 22.10.2020. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics.

9. Тимохін О. В. Інформаційне забезпечення систем керування електричними мережами на основі передачі широкополосних сигналів по РЕМ 0,4...10 кВ: дис. канд. техн. наук: 05.14.02 / Тимохін Олександр Вікторович. Київ, 2019. 171с.

10. Улахович Д. А. Основы теории линейных электрических цепей: Учебное пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.

systems as elements with distributed parameters based on Maxwell equations and electrical and magnetic properties of element materials with using of finite element method. Proposed approach allows taking into account the redistribution of electrical and magnetic fields and skin-effects. **Results.** Studies have shown the constancy of the transverse capacitance at frequencies up to 100 kHz and its reduction at frequencies above 100 kHz to $0.174 \mu\text{F} / \text{km}$ (23%) at a frequency of 10 MHz, which may be due to the redistribution of the field in the cable volume of complex design. Longitudinal conductivity, on the other hand, increases significantly with a frequency of $3.491 \cdot 10^{-7} \text{ Cm} / \text{km}$ at a frequency of 10 Hz to $533.134 \text{ Cm} / \text{km}$ at a frequency of 10 MHz, due to its direct dependence on the frequency. **Originality.** An approach for calculating the primary parameters of DEN as line with distributed parameters for purpose of high frequency signal transmitting was offered. Effectiveness of developed approach was compared with the obtained data in practice, which confirms its effectiveness. **Practical value.** The practical value of this article is the proposed approach to calculation of the primary parameters of the line of DEN as a line with distributed parameters for spatial 3D models of DEN lines with considering electric and magnetic properties of the lines. **Conclusions.** Studies have shown the possibility for determining the primary parameters of DEN as a line with distributed parameters by numerical solution of Maxwell's equations for spatial 3D models of DEN lines with considering electrical and magnetic properties of lines materials.

Key words: power line communication, electric networks, finite element method.

REFERENCES

1. Kostenko, M. V., Perelman, L. M., Shkarin, J. P. (1973), *Volnovue processy i elektricheskie pomehi v mnogoprovodnykh liniyakh vysokogo napryazheniya* [Wave processes and electrical interference in high-voltage multi-wire lines]. M.: publishing house "Energiya"
2. Smirnov, B. V., Ilin, A. A. (1963), *Peredacha signalov po raspredelitelnykh elektricheskim setyam: Osnovy teorii i rascheta* [Signal transmission over electrical distribution networks: Fundamentals of theory and calculation.] K.: State Publishing House of Technical Literature of the USSR.
3. Tymokhin, O. (2014), *Pidvyshchennia efektyvnosti peredachi informacii po rozpodilnym elektrichnym meregam 0.4-10 kV* [Improving the efficiency of information transmission over 0.4-10 kV electrical distribution networks]. Journal of Vinnytsia Polytechnic Institute №1, p.66-69.
4. Yandulskii, O.S., Tymokhin, O.V. (2007), *Ocenka vlianiia karakteristik raspredelitelnykh elektricheskikh setei 0.4..20 kV na process rasprostraneniia shirokopolosnykh signalov v raspredelitelnykh elektricheskikh setiah* [Estimation of influence of characteristics of distributive electric networks of 0.4... 20 kV on process of distribution of broadband signals in distributive electric networks] Journal of Khmelnytsky National University. Technical sciences, T.1. №2, pp.167–171.
5. Ogorodnychuk I.P., Ostrouhov V.D. (1972), *Rozrahunok kanaliv telemehaniky po rozpodilnykh elektrichnykh meregah* [Calculation of telemechanics channels on electrical distribution networks]. K.: "Tehnika".
6. Lyapin K. S., Prihodko D. V. (2009), *Elektrodynamika SVCH: uchebnoe posobie T.2* [Microwave Electrodynamics: A Textbook. T.2]– M.: MITE.
7. Metod konechnykh elementov. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_конечных_элементов> [Accessed: 24 March.2020].
8. COMSOL Multiphysics. Available at: <<https://uk.wikipedia.org/wiki/>> [Accessed: 22 October 2020].
9. Tymokhin, O. (2019), *Information support of electric networks control systems on the basis of broadband signals transmission by distributive electrical networks 0.4...10 kV*. Ph.D. Thesis. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».
10. Ulahovich, D.A. (2009), *Osnovy teorii lineinykh elektricheskikh cepei: uchebnoe posobie* [Fundamentals of the theory of linear electric circuits: Textbook]. SPb.:BHV-Petersburg.

Стаття надійшла 23.10.2020.