

**КЛАСИЧНІ МОДЕЛІ ПРОВІДНИКОВИХ ЛІНІЙ ПЕРЕДАЧ**

*В статті розглядаються класичні моделі провідникових регулярних ліній передачі, що застосовуються в загальному аналізі провідникових ліній. Показано, що відомі прості моделі є спрощеними і не дають можливості врахування частото-залежних параметрів лінії у первинних та вторинних параметрах лінії.*

*Ключові слова: провідникова регулярна лінія, проста модель лінії.*

K.L. HORYASCHENKO

Khmelnytsky National University

**CLASSICAL MODELS OF CONDUCTOR TRANSMISSION LINE**

*The article deals with the classical model of regular conductor transmission lines used in the overall analysis of conductor lines. The famous simple model is simplified and does not allow for incorporation of frequency-dependent parameters of the line in the primary and secondary parameters line.*

*Keywords: regular line, simple model of line.*

**Вступ**

За останні роки суттєво зросла зацікавленість у моделюванні провідникових ліній із застосуванням різного програмного забезпечення. Причини такого зростання є цілком очевидні. Високі капітальні витрати, невідновлювана ізоляція та висока вартість на обслуговування та заміну кабельних мереж у випадку руйнування ізоляції або провідникового осердя. Крім того, необхідність визначення поточного стану лінії, її параметрів, тенденцій в роботі та інші – всі ці фактори стимулюють створення та дослідження математичних моделей провідникових ліній. Кожна з моделей має бути максимально адекватна до досліджуваної реальної лінії.

**Постановка задачі**

Математична модель провідникової лінії повинна відповідати визначеному типу лінії або окремої групи ліній. Під відповідністю моделі приймають відтворення характеристик цієї кабельної лінії. Це дає можливість визначати особливості будови, взаємодію елементів між собою, взаємодію між елементами та зовнішнім середовищем, визначати умови роботи із сигналом, що розповсюджується в лінії та обов'язково надавати можливість проводити аналіз роботи цієї лінії, так і повинна дозволяти проаналізувати роботу та зміну характеристик різноманітних з'єднань, що утворені відрізками кабелю та підключені до зовнішніх пристроїв.

В загальному випадку, якщо в процесі виробництва кабельної лінії не порушуються технологічні норми виробництва, то геометричні параметри лінії, а також властивості матеріалів, з яких виготовлена лінія лишаються стабільними по всій довжині. Тоді ці лінії називаються регулярними [1], а самі лінії належать до класу лінійних систем. Для лінійних систем можна використати принцип суперпозиції, згідно якого, знаючи реакцію на вплив гармонійних коливань з різними частотами  $\omega_j$ .

Відомо, що прийнявши відоме значення первинних параметрів для лінії передачі індуктивності –  $L_1$ , ємності –  $C_1$ , опору –  $R_1$  та провідності –  $G_1$ , можна визначити погонні параметри лінії [1]:

- погонний комплексний опір:  

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1, \tag{1}$$

- погонна комплексна провідність:  

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1. \tag{2}$$

Вирази (1) та (2) в загальному дозволяють охарактеризувати фізичні властивості окремих елементарних чотиріполюсників, якими може бути представлена проста лінія.

Фактично ці два рівняння і встановлюють одну з **найперших моделей** провідникової лінії як сукупності послідовно розміщених Г-подібних ланок (рис. 1), за допомогою якої відбувається вивід рівнянь стану лінії – телеграфних рівнянь.

Друга відома класична модель – це так звана П-подібна модель, в якій використовуються два симетрично включених провідності із величиною  $Y_1\Delta z/2$ , але результат її застосування є аналогічним Г-подібній моделі [1].

Не зважаючи на те, що класична модель описує параметри лінії зв'язку, все ж залишається

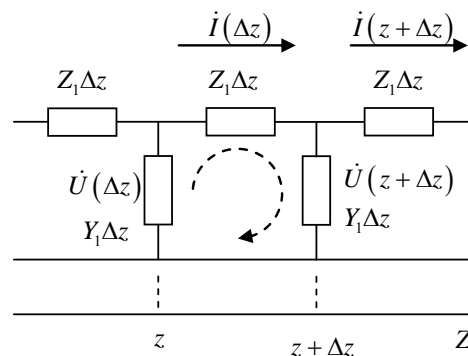


Рис. 1. До виводу телеграфних рівнянь в класичному вигляді [1]

проблемою застосування або приведення класичної моделі до реальної системи. Так на практиці зустрічається застосування декількох варіантів еквівалентних моделей кабельних ліній зв'язку (рис. 2). Представлені моделі не відображують всієї сукупності моделей, що використовуються.

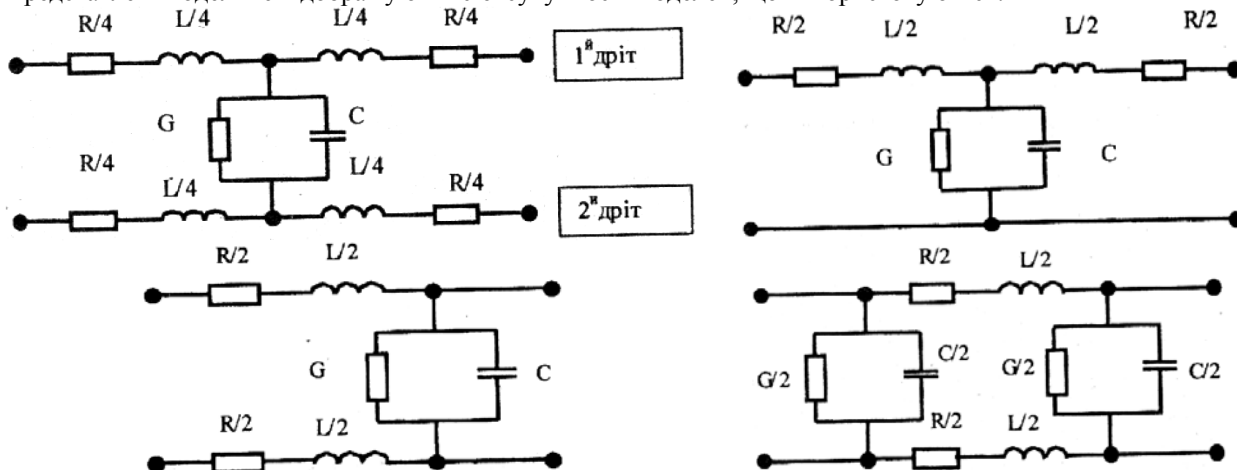


Рис. 2. Варіанти еквівалентних схем ліній зв'язку

Наслідком використання класичної моделі є відомі телеграфні рівняння [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\dot{U}}{dz} &= -Z_1 \dot{I} \\ \frac{d\dot{I}}{dz} &= -Y_1 \dot{U} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

та рівняння Гельмгольца [1]:

$$\frac{d^2 \dot{U}}{dz^2} - Z_1 Y_1 \dot{U} = 0 \quad (4.1)$$

та

$$\frac{d^2 \dot{I}}{dz^2} - Z_1 Y_1 \dot{I} = 0 \quad (4.2)$$

Принципова різниця між рівняннями (3) та (4) є те, що телеграфні рівняння визначають часові, а рівняння Гельмгольца – просторові характеристики процесу.

При розв'язку рівнянь Гельмгольца виділяють ряд значень, що дозволяють визначити вторинні параметри кабельної лінії. Один з найбільш цікавих параметрів є коефіцієнт розповсюдження сигналу  $\gamma$  в лінії [1]:

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1},$$

або в розгорнутій формі:

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

де  $\alpha$  – коефіцієнт амплітудного згасання – дійсна частина;

$\beta$  – коефіцієнт фазового зсуву хвилі напруги, що проходить через лінію, або коефіцієнт фази – уявна частина;

Відповідно, кожна з цих величин визначається як:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ R_1 G_1 - \omega^2 L_1 C_1 + \sqrt{(R_1^2 + \omega^2 L_1^2)(G_1^2 + \omega^2 C_1^2)} \right]}, \quad (5.1)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \left[ \omega^2 L_1 C_1 - R_1 G_1 + \sqrt{(R_1^2 + \omega^2 L_1^2)(G_1^2 + \omega^2 C_1^2)} \right]}. \quad (5.2)$$

Окрім коефіцієнта розповсюдження можна визначити і інші вторинні параметри кабельної лінії. Серед таких є:

– хвильовий опір лінії  $\dot{Z}_{xe}$  (повздовжній опір лінії) [1]:

$$\dot{Z}_{xe} = (R_1 + j\omega L_1) / \gamma = \frac{R_1 + j\omega L_1}{\sqrt{G_1 + j\omega C_1}} = |Z_{xe}| \cdot e^{j\varphi} \quad (5)$$

– поперечна сумарна провідність лінії:

$$\dot{Y}_{xe} = (G + j\omega C) / \gamma \quad (5)$$

Коефіцієнт розповсюдження сигналу  $\gamma$  в загальному випадку тоді буде представляти такий вираз:

$$\gamma = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} \tag{6}$$

Відомі елементарні розрахунки приводять нас до виразів хвильового опору та кута фазового зсуву між комплексними амплітудами напруги та струму в біжучій хвилі [1]:

$$|Z_e| = \sqrt{\frac{R_1^2 + \omega^2 L_1^2}{G_1^2 + \omega^2 C_1^2}},$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{G_1 - \frac{R_1}{\omega L_1}}{1 + \frac{G_1 R_1}{\omega^2 L_1 C_1}}.$$

Кабельні системи із декількома провідниками призводять до утворення більш складних еквівалентних моделей, що обумовлено врахуванням взаємовпливу між групами з провідників. Так на рис. 3. показана еквівалентна схема заміщення виті пари довжиною у 100 м згідно стандарту IEEE 802.3 [10].

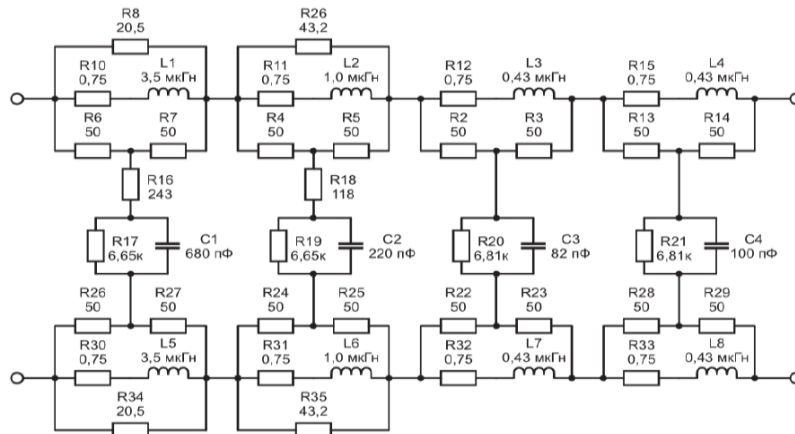


Рис. 3. Еквівалентна схема заміщення виті пари довжиною у 100 м згідно стандарту IEEE 802.3

Створення адекватної моделі лінії є також не тривіальною задачею, над якою працювали та продовжують працювати вітчизняні та закордонні вчені – Felipe Alejandro Uribe, Juse Luis Naredo, Pablo Mogeno, Leonardo Guardado (Mexico), Andre D. Filomena, Mariana Resener, Rodrigo H. Salim, Arturo S. Bretas (Brazil), Alecio B. Fernandes, Washington L.A. Neves (Brazil), U. S. Gudmundsdottir, C. L. Bak and W. T. Wiechowski (Denmark), Рожновський М.В. (Україна), Павликевич М.Й. (Україна) [4-9].

Ускладнює створення моделі провідникової лінії частотна залежність параметрів кабельної лінії. Таки важливі параметри як індуктивність, ємність, опір та провідність в реальних лініях є частотозалежними величинами. На рис. 4. показана узагальнена характеристика зміни значень погонних параметрів провідникової лінії від частоти.

Тому, виходячи з рис. 4, зрозуміло наскільки спрощеною є розглянуті моделі ліній. Значення провідності лінії, індуктивності, ємності та опору є частотозалежними. Отже, вирази (9.1) та (9.2) не дозволяють охарактеризувати хвильовий опір та кут фазового зсуву єдиними значеннями.

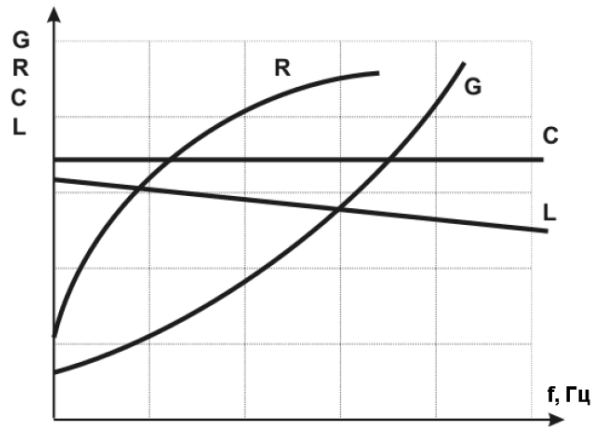


Рис. 4. Узагальнена характеристика зміни значень погонних параметрів провідникової лінії [3]

**Висновки**

1. Представлені класичні моделі є ідеалізованими моделями без врахування частотних параметрів її змінних.
2. Частотна залежність погонних параметрів провідникової лінії вимагає створення частотозалежної моделі кабельної лінії або частотонезалежної моделі лінії з можливістю виведення частотозалежних параметрів з цієї моделі.
3. Наявність частотозалежних параметрів в провідникової лінії призводить до необхідності встановлення граничних параметрів за частотою при яких класичні або сучасні моделі провідникових ліній є найбільш адекватними для практичного застосування.

## Література

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами : учеб. пособие для вузов / С.И. Баскаков. – М. Высшая школа, 1980. – 152 с.
2. Павликевич М.Й. Математична модель багатопровідного кабеля типу "скручена пара" / М.Й. Павликевич // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". – 2011. – № 705. – С.112-118.
3. Арутюнян А.Р. Построение математической модели передачи данных по интерфейсу RS-485 для промышленных сетей / А.Р. Арутюнян, А.Л. Масюк, С.Р. Арутюнян // Наукові праці ДонНТУ, серія "Машинобудування і машинознавство", 2006. – С.117-123.
4. Felipe Alejandro Uribe. Electromagnetic transients in underground transmission systems through the numerical Laplace transform / Felipe Alejandro Uribe, Juse Luis Naredo, Pablo Moreno, Leonardo Guardado / Electrical power & Energy systems. P.215-221.
5. Fault location for underground systems with capacitive current compensation / Andre D. Filomena, Mariana Resener, Rodrigo H. Salim, Arturo S. Bretas // 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008
6. Frequency-dependent low order approximation of transmission line parameters / Alecio B. Fernandes, Washington L.A. Neves // IPST'99 – International Conference on Power Systems Transients. – June 20-24, 1999, Budapest, Hungary. – p. 43-48.
7. Modeling of long high voltage AC underground cables / U. S. Gudmundsdottir , C. L. Bak and W. T. Wiechowski // Paper submitted to the PhD Seminar on Detailed Modelling and Validation of Electrical Components and Systems 2010 in Fredericia. – p. 16-22.
8. Рожновский М.В. Исследование витой пары при экспофункциональных воздействиях / М.В. Рожновский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – №2.
9. Павликевич М.Й. Математична модель багатопровідного кабеля типу "кручена пара" / М.Й. Павликевич // Вісник Національного університету "Львівська політехніка", серія "Радіоелектроніка та телекомунікації". - №705. – С. 112-118.
10. IEEE Standard for Information technology: Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks. Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications: IEEE Std 802.3 — 2002. — 1538 p. (Международный стандарт).

## References

1. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie cipi s raspredelennymi parametrami : ucheb. posobie dlja vuzov / S.I. Baskakov. – M. Vysshaja shkola, 1980. – 152 s.
2. Pavlikevich M.J. Matematichna model' bagatoprovodnogo kabelja tipu "skruchena para" / M.J. Pavlikevich // Visnik Nacional'nogo universitetu "L'vivs'ka politehnika". – Serija "Radioelektronika ta telekomunikacii". – 2011. – № 705. – S.112-118.
3. Arutjunjan A.R. Postroenie matematicheskoj modeli peredachi dannyh po interfejsu RS-485 dlja promyshlennyh setej / A.R. Arutjunjan, A.L. Masjuk, S.R. Arutjunjan // Naukovi praci DonNTU, serija "Mashinobuduvannja i mashinoznavstvo", 2006. – S.117-123.
4. Felipe Alejandro Uribe. Electromagnetic transients in underground transmission systems through the numerical Laplace transform / Felipe Alejandro Uribe, Juse Luis Naredo, Pablo Moreno, Leonardo Guardado / Electrical power & Energy systems. P.215-221.
5. Fault location for underground systems with capacitive current compensation / Andre D. Filomena, Mariana Resener, Rodrigo H. Salim, Arturo S. Bretas // 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008
6. Frequency-dependent low order approximation of transmission line parameters / Alecio B. Fernandes, Washington L.A. Neves // IPST'99 – International Conference on Power Systems Transients. – June 20-24, 1999, Budapest, Hungary. – p. 43-48.
7. Modeling of long high voltage AC underground cables / U. S. Gudmundsdottir , C. L. Bak and W. T. Wiechowski // Paper submitted to the PhD Seminar on Detailed Modelling and Validation of Electrical Components and Systems 2010 in Fredericia. – p. 16-22.
8. Rozhnovskij M.V. Issledovanie vitoj pary pri jekspofunkcional'nyh vozdejstvijah / M.V. Rozhnovskij // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2010. – №2.
9. Pavlikevich M.J. Matematichna model' bagatoprovodnogo kabelja tipu "kruchena para" / M.J. Pavlikevich // Visnik Nacional'nogo universitetu "L'vivs'ka politehnika", serija "Radioelektronika ta telekomunikacii". - №705. – S. 112-118.
10. IEEE Standard for Information technology: Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks. Part 3: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications: IEEE Std 802.3 — 2002. — 1538 p. (Mezhdunarodnyj standart).

Рецензія/Peer review : 8.7.2014 р. Надрукована/Printed :13.7.2014 р.  
Рецензент: д.т.н. Троишин І.В.