

ОГЛЯД СУЧАСНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОВІДНИКОВИХ ЛІНІЙ

Представлено огляд сучасних моделей провідникових ліній, що використовуються в процесі моделювання із застосуванням сучасного програмного забезпечення. Показані моделі, що є спрощеними або достатньо адекватними реальним лініям. Застосування моделей дозволяє визначати частотні та фазові властивості провідникової лінії довільної конфігурації.

Ключові слова: модель лінії, частотозалежна модель

K.L. HORYASCHENKO, V.S. KLIMCHUK

Khmelnytsky national university, Khmelnytsky, Ukraine

REVIEW OF CURRENT MODELS CONDUCTION LINES

Abstract. The review of current models of conductor lines used in the simulation process using modern software. The following models are simplified enough or adequate real lines. The use of models allows to determine the frequency and phase properties of conductive lines any configuration.

Keywords: model line, frequency dependent model.

Вступ

Класична модель провідникової лінії відома досить давно. В роботі [1] було проведено аналіз відомих класичних моделей провідникових ліній, що базуються на відомій моделі на базі рівнянь Гельмгольца. Найголовнішим є вирази для погонних параметрів лінії [2]:

- погонний комплексний опір:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1, \quad (1)$$

- погонна комплексна провідність:

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1. \quad (2)$$

де L_1 – індуктивність, C_1 – ємність, R_1 – опір, G_1 – провідність.

Постановка задачі

Найважливішим наслідком проаналізованих класичних моделей є складність застосування моделей у практичному підході. З виразів (1) та (2) слідує частотозалежність параметрів провідникової лінії. Складність виразів (1) та (2) також полягає у тому, що й параметри L_1 , C_1 , R_1 , G_1 – також є частотозалежними. На рис. 1 показана узагальнена характеристика зміни значень погонних параметрів провідникової лінії від частоти.

Отже, класичні моделі є частотозалежними. Враховуючи стрімке зростання галузей, що займаються виробництвом, встановленням та обслуговуванням провідникових ліній є актуальною задача створення та використання моделей, що є зручними для моделювання із застосуванням засобів автоматизації.

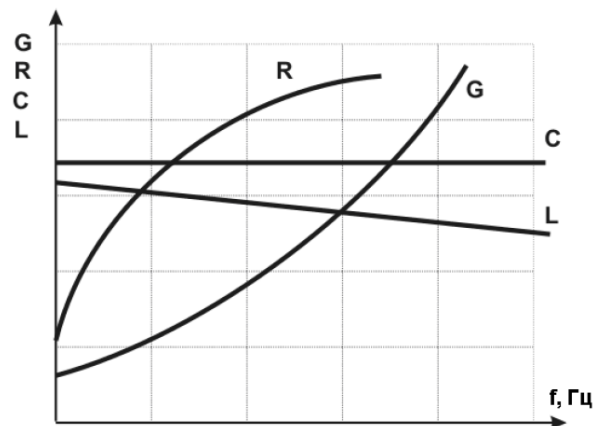


Рис. 1. Узагальнена характеристика зміни значень погонних параметрів провідникової лінії [3]

Модель ABCD-параметрів

Однією з основ для сучасних імітаційних моделей використовується модель ABCD-параметрів. Лінію передачі будь-якої довжини можна представити як чотириохтермінальну мережу. Суть моделі показано на рис. 2.

В цій моделі відношення між передавальними і приймальними напруг і струмів можуть бути виражені як:

$$\begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix}$$

де V_s і I_s – напруга і струм вихідні, а V_r і I_r – напруга і струм на вихідному кінці, відповідно.

У разі, якщо значення з боку вихідних напруги і струму відомі, на приймальному кінці напругу і струм можна знайти як:

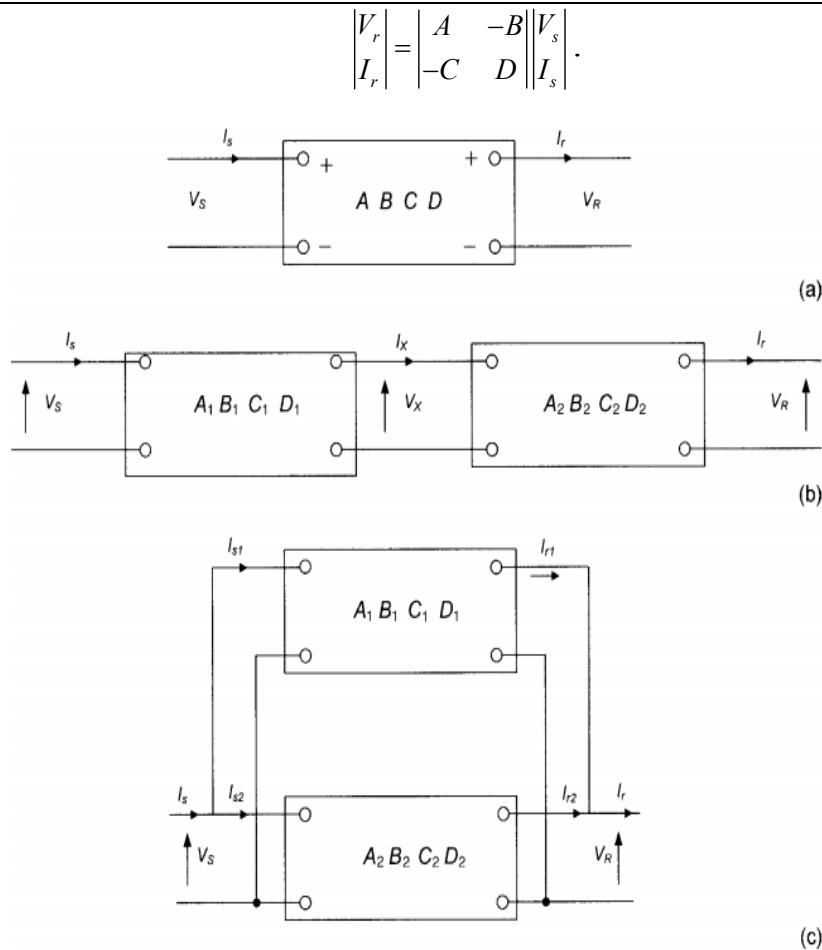


Рис. 2. Модель ABCD-параметрів: а) схематичне представлення двополюсника, що використовує константи ABCD; б) дві мережі послідовно; в) дві мережі паралельно

Значення A , B , C , і D параметрів може бути зазначено наступним чином:

$A = V_s / V_r$, коли $I_r = 0$, тобто на приймаючій стороні стався обрив. Це відношення двох напруг і, таким чином, ця величина є безрозмірна.

$B = V_r / I_r$, коли $V_r = 0$, тобто на приймаючій стороні сталося коротке замикання. Воно має розміри імпедансу і вказується в Ом.

$C = I_s / V_r$, коли на приймаючій стороні стався обрив і $I_r = 0$. Це допустимо.

$D = I_s / I_r$, коли $V_r = 0$, тобто на приймаючій стороні коротке замикання. Це відношення двох струмів і, таким чином, ця величина безрозмірна.

Дві ABCD мережі послідовні (рис. 2, б) можуть бути зведені до одної еквівалентної мережі таким чином:

$$\begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 B_1 \\ C_1 D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 B_2 \\ C_2 D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 A_2 + B_1 C_2 & A_1 B_2 + B_1 D_2 \\ C_1 A_2 + D_1 C_2 & C_1 B_2 + D_1 D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_r \\ I_r \end{vmatrix}$$

Для паралельних мереж ABCD (рис. 2, в) у поєднанні з ABCD параметрами:

$$A = (A_1 B_2 + A_2 B_1) / (B_1 + B_2)$$

$$B = (B_1 B_2) / (B_1 + B_2)$$

$$C = (C_1 + C_2)$$

$$D = (B_2 D_1 + B_1 D_2) / (B_1 + B_2)$$

Зручність моделі ABCD-параметрів полягає у можливості отримання ряду моделей з моделі ABCD-параметрів шляхом встановлення значення відповідних параметрів. В таблиці 1 приведені відповідні моделі та значення параметрів [6].

Параметри моделі ABCD-параметрів та відповідні вихідні моделі [6]

Назва моделі	Матриця параметрів $\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix}$	Опис моделі
Лінія без втрат (L, Lossless)	$\begin{vmatrix} 1 & X_L \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	Лінія володіє тільки реактивним опором, обумовленим індуктивністю. $Z = j\omega L = X_L$
Лінія з омичними втратами (RL)	$\begin{vmatrix} 1 & X_L + R \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$	Більш реалістична лінія. Введено омичний опір R
Лінія з ємнісним характером (LC)	$\begin{vmatrix} 1 & X_L \\ Y_C & 1 + X_L Y_C \end{vmatrix}$	Модель для високовольтних ліній з великою протяжністю. $Y_C = j\omega C$
Номінальна π -модель; Модель Аматані; Точна π -модель	$\begin{vmatrix} 1 + \frac{ZY}{2} & Z \\ Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & 1 + \frac{ZY}{2} \end{vmatrix}$	Розширення LC-моделі з введеними послідовними опорами. Модель з незмінними параметрами у кожній комірці лінії відома також як модель Аматані [3]. Модель із визначеними при певній частоті параметрами є "точною π -моделью" $Z = R + j\omega L, \frac{Y}{2} = j\omega\left(\frac{C}{2}\right)$
Модель з розподіленими параметрами	$\begin{vmatrix} ch(\gamma l) & Z_c sh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} sh(\gamma l) & ch(\gamma l) \end{vmatrix}$	Модель лінії, яка враховує процес передачі сигналу в лінії довжиною l , а отже і напруга та струм в довільній точці кабелю будуть різними. $\gamma = \sqrt{ZY}$ – коефіцієнт розповсюдження.

Моделі з розподіленими параметрами

Моделі з розподіленими параметрами (distributed parameter models) являють собою основу сучасних уявлень про процеси, що мають місце в провідниковій лінії за умов як достатньої протяжності лінії так і необхідності у моделюванні в широкому діапазоні входних частот. В загальному випадку, моделі з розподіленими параметрами базуються на теорії розповсюдження хвилі в лінії [5]. Процес аналізу полягає у розбитті кабельної системи на окремі фазові частини із значеннями $V_{\text{фаз}}, I_{\text{фаз}}$. В подальшому стани цих фазових частин використовуються для розв'язку системи диференціальних рівнянь із застосуванням лінійних трансформацій для отримання модальних відліків $V_{\text{мод}}, I_{\text{мод}}$ [7]:

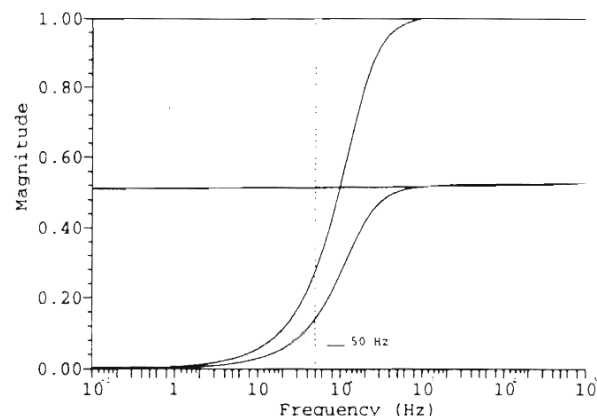
$$V_{\text{мод}} = Q^t \cdot V_{\text{фаз}}$$

$$I_{\text{фаз}} = Q^{-1} \cdot I_{\text{мод}}$$

В роботі [7] показано, що можливе спрощення моделі за рахунок використання так званої моделі з постійними розподіленими параметрами (CP-model, distributed constant-parameter model). Ця модель відома як модель Доммела (Dommel line model). В цій моделі провідність G ігнорується, а інші (R, L, C) – приймаються постійними. Така модель зручна для швидкого обрахунку стану лінії за відомої частоти, проте дає низьку точність обрахунку.

Однією з найбільш широко використовуваних моделей лінії високовольтної передачі є частотозалежна модель лінії (FD, Frequency dependent model, також відома як модель JMARTI для повітряних ліній) запропонована Дж. Марті [4]. Ця модель включає частотну залежність параметрів лінії і їх розподілений характер, і припускає дійсність і постійна матриця перетворення, щоб відокремити розповсюдження методу. В цій моделі частотна залежність характеристик та їх розподілення у просторі можуть бути достатньо добро представлено шляхом апроксимації. FD модель лінії була дуже надійна і точна для більшості з випадків повітряних ліній, але не для підземних кабелів, для яких перетворення залежать від частоти. Приклад зміни властивості матриці перетворень від частоти наведено на рис. 3.

Модель з частотозалежною матрицею Q (Frequency Dependent Q , FDQ) або модель із змінною матрицею перетворень. Врахування залежності параметрів від частоти дає можливість більш точніше

Рис. 3. Зміна розмаху матриці Q для трифазного кабелю [7]

обраховувати параметри лінії [9], але вимагає більше ресурсів..

Кабельна модель, що розвивається Дж.Мартіном вирішує проблему і сильно залежить від частоти матриці перетворення синтезуючи цю матрицю з раціональними функціями в частотній області. Ця модель дає дуже добрі результати для кабельного моделювання як в низьких, так і високих частот явища. Нове векторне пристосування техніки недавно введено Густавз і Семлен [7], щоб збільшити обчислювальну ефективність моделювання. Не дивлячись на дуже точні результати, представлені в цій техніці, процедура все ще не може гарантувати абсолютну числову стабільність залежних від частоти функції.

Модель кабелю типу z-Cable (zCable)

Ця модель може бути сформульована безпосередньо в фазових координатах і дозволяє повністю виключити застосування матриці модельного розкладення Q . Основні принципи z-моделі кабелю були запропоновані ще в [10, 11, 12, 13]. Підхід z-моделі кабелю – розділити представлення хвилі розповсюдження явища на дві частини: а) ідеальна лінійна секція з постійними параметрами, і б) секція з залежними від частоти параметрами та відповідно з втратами. На рис. 4. показано принцип представлення моделі лінії.

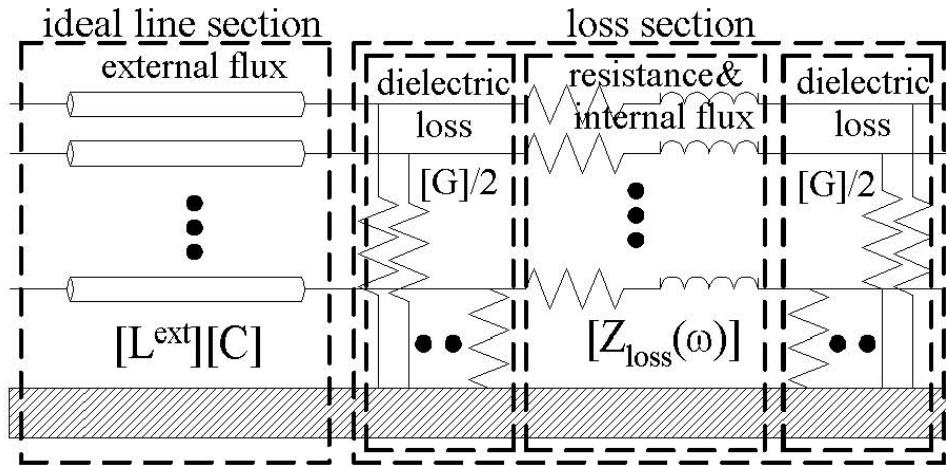


Рис. 4. Принцип представлення моделі лінії як поєднання ідеальної частини та частини з втратами [14]

Різниця від існуючих раніше моделей є те, що моделюється частина з ідеальними параметрами, а частотозалежна частина дозволяє виконати синтез більш точнішої частотозалежної матриці $[Z_{loss}(\omega)]$ у фазових координатах.

Рівняння поширення хвиль в частотній області може бути виражена як:

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = [ZY] \cdot V \quad \text{і} \quad \frac{d^2 I}{dx^2} = [YZ] \cdot I$$

де $[ZY]$ і $[YZ]$ є повноправними матрицями, що пара поширенням хвиль напруги і струму в кожній фазі. Елементи залежать від частоти серії імпедансу, матриця $[Z]$ може бути описана як:

$$Z_{ij}(\omega) = R_{ij}(\omega) + j\omega(L_{ij}^{int}(\omega) + L_{ij}^{ext}),$$

де $R_{ij}(\omega)$ - включає опір провідника і заземлення;

$L_{ij}^{int}(\omega)$ - внутрішня індуктивність, пов'язана з потоком всередині провідника і заземленням;

$L_{ij}^{ext}(\omega)$ - зовнішня індуктивність, поза провідника.

Тому матриця $[Z]$ також може бути виражена як:

$$[Z(\omega)] = ([R(\omega)] + j\omega[L^{int}(\omega)]) + j\omega[L^{ext}] = [Z_{loss}(\omega)] + j\omega[L^{ext}] = [Z_{loss}(\omega)] + [Z_{ideal}]$$

Матриця шунтів $[Y]$ може бути описана як:

$$[Y] = [G] + j\omega[C],$$

де $[G]$ є шунт провідність матриця, що представляє діелектричні втрати, $[C]$ – матриця шунтуючої ємності, що дозволяє зберегти провідник потенціалу вздовж ізоляції.

Елементи $[C]$ залежать від діелектричної проникності діелектрика і діаметра провідника та ізоляції. Елементи $[G]$ і $[C]$ передбачаються постійними. Z-модель кабелю ґрунтується на тому, що повна кабельна довжина ділиться на коротші сегменти. Потім кожен сегмент моделюється таким, що складається з двох секцій: ідеальна частина та частина з втратами (рис.4). Довжина сегмента моделювання обирається в залежності від частоти сигналу [14].

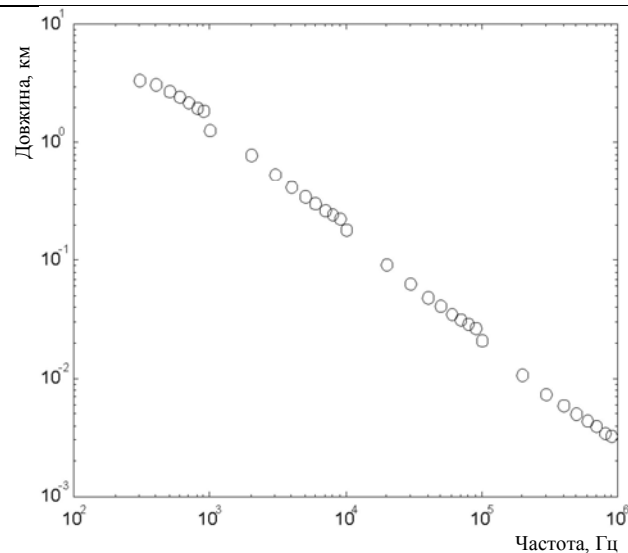


Рис. 5. Зв'язок між довжиною сегмента та частотою

Ідеальна лінія включає в себе зовнішнє магнітне та електричні поля $[L^{ext}]$ і $[C]$ ці параметри залежать тільки від геометрії кабелю і не залежать від частоти.

Секція з втратами складається з двох підрозділів. Перший підрозділ включає опір $[R(\omega)]$ і внутрішню індуктивність $[L^{int}(\omega)]$, ці параметри частоти залежать від скін-ефекту. Цей підрозділ може бути згрупований в один ряд зосередженими матриці $[Z_{loss}(\omega)]$. Інший підрозділ постійна діелектрична $losses[G]$.

Порівняння моделей FD, FDQ, zCable для моделювання впливів на лінію за умов короткого замикання, вільного кінця лінії (без навантаження) та імпульсного впливу показано на рис. 6 [14].

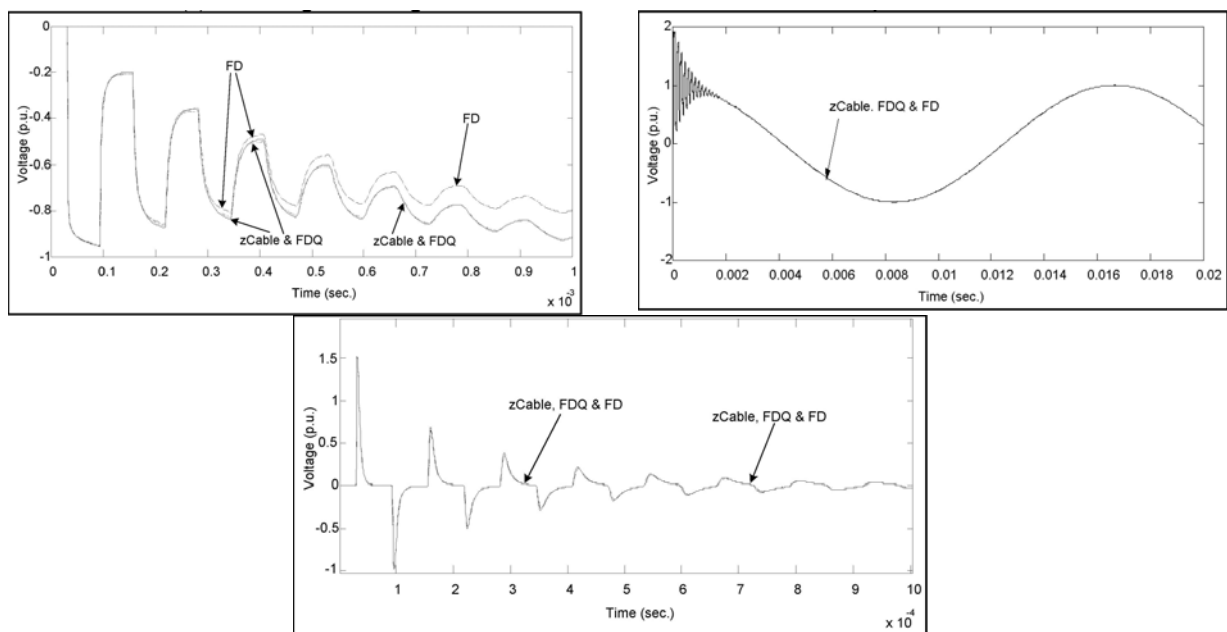


Рис. 6. Порівняння моделей FD, FDQ, zCable за умов моделювання лінії за умов короткого замикання, вільного кінця лінії (без навантаження) та імпульсного впливу

Висновки

В результаті проведеного аналізу існуючих моделей провідникових ліній виявлено:

1. Задача моделювання провідникової лінії є актуальною задачею, що ставить на меті створення сучасних моделей провідникових ліній як повітряного так і підземного розміщення із врахуванням як постійних так і частотозалежних властивостей лінії.
2. Сучасна модель провідникової лінії призначена для моделювання стану лінії в широкому діапазоні робочих частот та частот тестового впливу - від 0,1 Гц до 1,0 МГц та вище.
3. Розроблені найбільш сучасні моделі FD, FDQ, zCable призначені для застосування у сучасному програмному забезпеченні моделювання стану та перехідних процесів в провідникових лініях, а тому дуже

Література

1. Горященко К.Л. Огляд класичних моделей провідникових регулярних ліній передачі / К.Л. Горященко // Вісник ХНУ. – Технічні науки. – 2012. – №5. – С. 247-250.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами : учеб. пособие для вузов / С.И. Баскаков. – М. Высшая школа, 1980. – 152 с.
3. N. Nagaoka and A. Ametani. Transient Calculation on Power Apparatus and Systems, pp. 779-787, April 1983
4. J.R. Marti. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transients simulations, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, pp.147-157, Jan. 1982.
5. H.W. Dommel. The EMTP Theory Book, Second Edition. The University of British Columbia, 1994.
6. http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Single-Phase_Line_Models
7. L. Marti, R.Y. Brierley, T.E. Grainger. Analysis of electromagnetic transients in cross-bounded cable systems using frequency dependent cable models. IPST'95 International Conference on Power Systems Transients, Lisbon, 3-7 September 1995. pp. 5-10.
8. H.W. Dommel. Simulating travelling waves inside and outside GIS enclosures with the EMTP. Electricity Today – Canada. Vol. 7, No. 3, March 1995.
9. J.R. Marti. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transients simulations. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102. pp.147-157, Jan. 1982.
10. Hung, Wei-Gang, A. Semlyen, "Computation of Electromagnetic Transients on Three-Phase Transmission Lines with Corona and Frequency Dependent Parameters", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, pp.887-898, July 1987
11. A. Ametani, N. Nagaoka, T. Noda, T. Matsuura, "A Simple and Efficient Method for Including A Frequency-Dependent Effect in A Transmission Line Transient Analysis", IPST'95 , pp.11-16, Lisbon, Portugal, 1995
12. F. Castellanos, J. Marti, "Phase-Domain Multiphase Transmission Line Models", IPST'95 , pp.17-22, Lisbon, Portugal, 1995
13. F. Castellanos, J. Marti, "Full Frequency-Dependent Phase Domain Transmission Line Model", IEEE Trans. on Power Systems, vol.12, no.3, pp.1331-1339, Aug. 1997.
14. T. C. Yu, J. R. Marti. zCable Model for Frequency Dependent Modelling of Cable Transmission Systems. International Conference on Power System Transients. IPST-2001.

References

1. Gorjashhenko K.L. Ogljad klasichnih modelej providnikovih reguljarnih linij peredachi / K.L. Gorjashhenko // Visnik HNU. – Tehnichni nauki. – 2012. – №5. – S. 247-250.
2. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie cepi s raspredelennymi parametrami : ucheb. posobie dlja vuzov / S.I. Baskakov. – M. Vysshaja shkola, 1980. – 152 s.
3. N. Nagaoka and A. Ametani. Transient Calculation on Power Apparatus and Systems, pp. 779-787, April 1983
4. J.R. Marti. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transients simulations, IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-101, pp.147-157, Jan. 1982.
5. H.W. Dommel. The EMTP Theory Book, Second Edition. The University of British Columbia, 1994.
6. http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Single-Phase_Line_Models
7. L. Marti, R.Y. Brierley, T.E. Grainger. Analysis of electromagnetic transients in cross-bounded cable systems using frequency dependent cable models. IPST'95 International Conference on Power Systems Transients, Lisbon, 3-7 September 1995. pp. 5-10.
8. H.W. Dommel. Simulating travelling waves inside and outside GIS enclosures with the EMTP. Electricity Today – Canada. Vol. 7, No. 3, March 1995.
9. J.R. Marti. Accurate modelling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transients simulations. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. PAS-102. pp.147-157, Jan. 1982.
10. Hung, Wei-Gang, A. Semlyen, "Computation of Electromagnetic Transients on Three-Phase Transmission Lines with Corona and Frequency Dependent Parameters", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No.3, pp.887-898, July 1987
11. A. Ametani, N. Nagaoka, T. Noda, T. Matsuura, "A Simple and Efficient Method for Including A Frequency-Dependent Effect in A Transmission Line Transient Analysis", IPST'95 , pp.11-16, Lisbon, Portugal, 1995
12. F. Castellanos, J. Marti, "Phase-Domain Multiphase Transmission Line Models", IPST'95 , pp.17-22, Lisbon, Portugal, 1995
13. F. Castellanos, J. Marti, "Full Frequency-Dependent Phase Domain Transmission Line Model", IEEE Trans. on Power Systems, vol.12, no.3, pp.1331-1339, Aug. 1997.
14. T. C. Yu, J. R. Marti. zCable Model for Frequency Dependent Modelling of Cable Transmission Systems. International Conference on Power System Transients. IPST-2001.

Рецензія/Peer review : 7.4.2014 р. Надрукована/Printed : 18.5.2014 р.

Рецензент: Троцишин І.В., д.т.н., проф., Одеська національна академія зв'язку ім. О. Попова