

УДК 654.05

**ЗАСТОСУВАННЯ «ЕХО МОДЕЛІ» ПРИ ПРОЕКТУВАННІ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ.**

*Онопа С. В., магістрант; Березянський Б. М., асистент  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ,, Україна*

**THE USE OF "ECHO MODEL" IN THE DESIGN OF DATA COMMUNICATION SYSTEM ON POWER SUPPLY NETWORKS**

*Onopa S. V., Undergraduate Student; Berezianskiy B. M., Assistant  
National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

**Вступ**

Перевагою використання електричних ліній в якості середовища передачі даних є те, що кожен будинок вже підключений до електромережі. Тому *PLC* системи зв'язку, в лініях електропередач, які використовують існуючу електропроводку зі змінним струмом, забезпечують високу швидкість доступу до мережі майже скрізь, де є розетки. У більшості випадків побудова домашньої мережі з використанням існуючої електропроводки змінного струму простіша, ніж прокладання окремої проводки, та більш безпечна і надійна, ніж бездротові системи.

З появою сучасних мережевих технологій з'явилася можливість розробити рішення, які здатні забезпечувати передачу інформації і поставляти послуги для споживачів при мінімальних затратах та максимальній продуктивності. Потенціал ліній електроживлення розглядається як потужний засіб для високошвидкісної передачі мультмедійного контенту і є об'єктом досліджень [1].

Комунікаційна технологія *Power Line* дозволяє використовувати мережі електроживлення для побудови систем зв'язку. Основною перевагою *PLC* є зниження експлуатаційних витрат і витрат на реалізацію нових телекомунікаційних мереж.

Системи *PLC* в середині будівель (будинків) можна розділити на дві групи:

- Вузкосмугові *PLC*, що дозволяють одержувати відносно низьку швидкість передачі даних (до 100 кбіт), які можна застосовувати для систем автоматизації та керування, а також для каналів звуку.
- Широкопсмугові *PLC* системи, які дозволяють одержувати більш високі швидкості передачі даних для телекомунікаційних послуг, таких, як

телефонія та інтернет. Широкопasmові *PLC* в мережах з низькою напругою живлення є економічно ефективним рішенням для мережі споживача [2].

Наведена робота присвячена одному з підходів моделювання мережі електроживлення як середовища для передачі даних в частотному діапазоні до 30 МГц всередині будівель. Для отримання передавальної та фазової характеристики використовувалась ехо модель або модель відбиття сигналів [3]. Модель будувалась для стандартної двопровідної електромережі.

### Особливості передачі по *PLC* каналу

Для моделювання необхідно провести дослідження *PLC* каналу та його характеристик. Крім того, в моделі *PLC* необхідно оговорити ефекти які виникають в ній, а саме загасання і затримка.

Існують різні підходи для опису середовища лінії живлення. Описаний далі підхід полягає у розгляді середовища *PLC* в якості багатопроменевого каналу. Багатопроменевий характер ЛЕП виник через наявність кількох гілок і неузгодженість повного опору, які викликають багатократні відбиття сигналів. Але цей підхід також має два основні недоліки. По-перше, існують високі обчислювальні витрати при оцінці затримки, амплітуди і фази які необхідно вимірювати на кожній частині мережі. По-друге, потрібно брати до уваги дуже високу кількість розгалуджень, пов'язаних з усіма можливими відбиттями сигналу від кінців вздовж лінії. В каналі також присутні великі шуми та високе загасання, які є змінними в часі, а також зміни фазових зсувів.

На даний час не існує стандартів для широкопasmового доступу для технології *PLC*. Існуючий Європейський стандарт *CENELEC EN 50065* розрахований для діапазону частот від 9 до 140 кГц. Для забезпечення високошвидкісного доступу необхідно розглядати широкопasmові системи *PLC*. Тому вибраний діапазон, від 1 МГц до 30 МГц, є достатнім для аналізу таких систем [2].

### Параметри двопровідної передавальної лінії

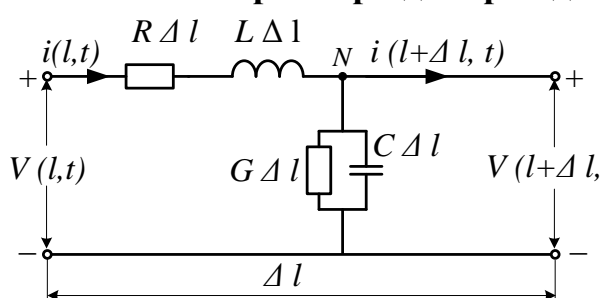


Рис. 1. Еквівалентна схема двопровідної лінії передачі

Схему диференційної лінії, довжиною  $\Delta l$ , наведено на рис. 1. Вона описується наступними параметрами:  $R$  — опір на одиницю довжини (обидва провідники), Ом/м;  $L$  — індуктивність на одиницю довжини (обидва провідники), Гн/м;  $G$  — провідність на одиницю довжини, См/м;  $C$  — ємність на одиницю довжини, Ф/м,  $R$  і  $L$  послідовно під'єднані елементи,  $G$  і  $C$  — шунтуючі елементи.

ни, См/м;  $C$  — ємність на одиницю довжини, Ф/м,  $R$  і  $L$  послідовно під'єднані елементи,  $G$  і  $C$  — шунтуючі елементи.

Згідно еквівалентної схеми параметри лінії визначаються наступними формулами (1 – 4): де  $C$  — ємність на одиницю довжини двопровідної лінії,  $a$  — радіус провoda та віддаленими провідниками на відстань  $D$  (Рис.2) визначається за формулою (1), де  $\varepsilon$  — діелектрична проникність лінії (Ф/м),  $\varepsilon_0$  — діелектрична постійна [4].

$$C = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\cosh^{-1}(D/2 \cdot a)}; \text{ (Ф/м)} \quad (1)$$

$$L = \frac{\mu}{\pi} \cdot \cosh^{-1}\left(\frac{D}{2 \cdot a}\right); \text{ (Гн/м)} \quad (2)$$

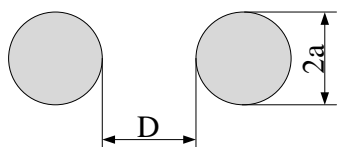


Рис. 2. Двопровідна лінія

Індуктивність на одиницю довжини лінії визначається за формулою (2), де  $\mu$  — магнітна проникність матеріалу лінії,  $\mu_0$  — магнітна стала [6].

Провідність на одиницю довжини лінії визначається за формулою (3), де  $\sigma$  — провідність матеріалу (См/м) [6].

Послідовний опір на одиницю довжини для обох дротів визначається за формулою (4).

$$G = \frac{\pi \cdot \sigma}{\cosh^{-1}(D/2 \cdot a)}; \text{ (См/м)} \quad (3)$$

$$R(f) = \frac{1}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu_c}{\sigma_c}}; \text{ (Ом/м)}, \quad (4)$$

де  $\mu_c$  — магнітна проникність матеріалу (Гн/м),  $\sigma_c$  — провідність матеріалу (См/м).

В якості матеріалу для побудови ліній електропередач широко використовують мідь та алюміній. Тому були використані наступні постійні, для мідного провoda:  $\mu_c = 10.3 \cdot 10^{-6}$ ,  $\sigma_c = 58.1 \cdot 10^6$ . Для провoda із алюмінію:  $\mu_c = 23 \cdot 10^{-6}$ ,  $\sigma_c = 37 \cdot 10^6$ . Згідно формул (1) —

(4) для провідника з параметрами  $a = 0.7 \cdot 10^{-3}$  м,  $D = 1.38 \cdot 10^{-3}$  м, ізоляційним матеріалом є полівінілхлорид. Значення ємності, індуктивності та провідності приведені в табл.1. При розрахунках враховувались такі значення постійних значень:  $\varepsilon = 2.9$  (Ф/м),  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  (Ф/м),  $\mu = 0.38 \cdot 10^{-6}$  (Гн/м),  $\mu_0 = 1.28 \cdot 10^{-6}$  (Гн/м),  $\sigma = 10^{-10}$  (См/м).

#### Характеристика PLC кабелю

Поширення сигналів по лінії супроводжується ослабленням, яке збільшується з довжиною лінії і частотою. Це ослаблення є функцією від імпе-

Таблиця 1  
Значення параметрів двопровідної лінії

$C$ (пФ/м)	123
$L$ (нГн/м)	79.2
$G$ (пСм/м)	48

дансу  $Z_L$  (5) та постійної поширення  $\gamma$  (6), які характеризують PLC. Ці два параметри можуть бути визначені з первинних параметрів: опору  $R$  на одиницю довжини, провідністю на одиницю довжини  $G$ , індуктивність на одиницю довжини  $L$  та ємність на одиницю довжини  $C$ , які як правило залежать від частоти і можуть бути визначені з формул [5]:

$$Z_L(f) = \sqrt{\frac{R(f) + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}} \quad (5)$$

$$\gamma(f) = \sqrt{(R(f) + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L) \cdot (G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C)} \quad (6)$$

$$\gamma(f) = \alpha(f) + j \cdot \beta(f), \quad (7)$$

де  $\alpha(f)$  — реальна частина постійної поширення,  $\beta(f)$  — уявна частина постійної поширення.

Для узгоджених ліній передачі передавальна функція, яка враховує довжину  $l$  може бути сформульована наступним чином:

$$H(f) = e^{-\gamma(f) \cdot l} = e^{-\alpha(f) \cdot l} \cdot e^{-j \cdot \beta(f) \cdot l} \quad (8)$$

Для випадку  $R(f) \ll 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$  і  $G \ll 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C$ , що відповідає лініям з малими (не значними) втратами — залежністю  $L$  і  $C$  на таких частотах можна знехтувати так що характеристику імпедансу  $Z_L$  та сталу поширення  $\gamma$  можна буде визначити використовуючи наступні наближення:

$$Z_L = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

Перетворивши формулу (7), отримуємо вираз (10).

$$\gamma(f) = \frac{1}{2} \cdot \frac{R(f)}{Z_L} + \frac{1}{2} \cdot G(f) \cdot Z_L + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}, \quad (10)$$

де:  $\frac{1}{2} \cdot \frac{R(f)}{Z_L} + \frac{1}{2} \cdot G(f) \cdot Z_L - \text{Re}\{\gamma\}$ ,  $j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C} - \text{Im}\{\gamma\}$ .

Якщо втрати при проходженні сигналу представляють собою втрати середовища на одиницю довжини, то загасання в середовищі залежно від довжини лінії *powerline*, представляють амплітуду передавальної функції каналу та можуть бути визначені із рівняння (11) [4].

$$A(f, l) = e^{-\alpha(f) \cdot l} \quad (11)$$

### Моделювання PLC каналу

Окрім частотно-залежного загасання, що характеризує *powerline* канал, в передавальній функції присутні глибокі вузькосмугові провали, які можуть бути розподілені на всьому діапазоні частот. Ці вирізи, викликані багаторазовими відбиттями від опору розривів. Довжина відповіді імпульсів і кількість піків може значно змінюватись в залежності від середовища поширення. Така поведінка може бути описана на основі «Ехо моделі» каналу, яка показана на рис. 3.

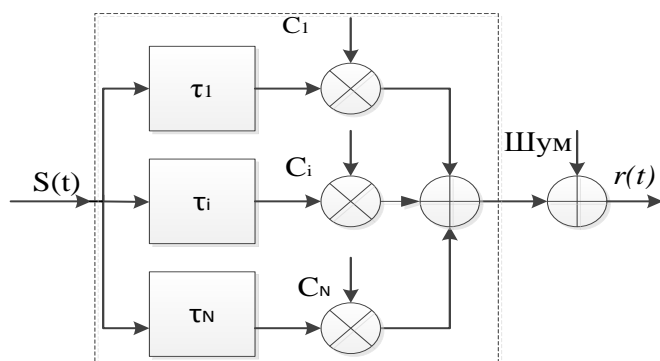


Рис. 3. Ехо модель, що представляє модель багатопроменевого PLC каналу характеристики  $h(t)$ :

$$h(t) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot \delta(t - \tau_i) \Leftrightarrow H(f) = \sum_{i=1}^N C_i \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_i} \quad (12)$$

Враховуючи формулу ослаблення сигналу (11), передаточну функцію частотного діапазону можна записати як:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, l_i) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \tau_i}, \quad (13)$$

де  $g_i$  — вагомий коефіцієнт, що враховує фактори відбиття та пропускання в лінії. Змінна  $\tau_i$ , що відображає затримку, яка вноситься в шлях  $i$  розраховується шляхом ділення довжини шляху  $l_i$  на фазову швидкість  $v_p$ .

Фазова швидкість розраховується за формулою:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (14)$$

Замінюючи загасання  $A(f, l_i)$  виразом із рівняння (11), отримаємо остаточне рівняння моделі PLC каналу, що охоплює параметри трьох його характеристик, а саме - загасання, зміна імпедансу і ефекти багатопроменевості. Основними складовими рівняння є ваговий коефіцієнт —  $g_i$ , загасання —  $e^{-\alpha(f) \cdot l}$  та затримка —  $e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l / v_p}$ . [2]

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot e^{-\alpha(f) \cdot l} \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot l / v_p} \quad (15)$$

Моделювання проводилось в середовищі *Matlab*. Ехо модель побудована для розгалуженої лінії, довжина кожної складової якої складає: 10, 50, 150, 200 метрів. Вихідні параметри моделі розраховані за формулами (1 – 4), значення яких приведено в табл. 1.

Результати моделювання ехо моделі для двопровідної лінії з матеріалу міді наведено на рис. 4 – 5.

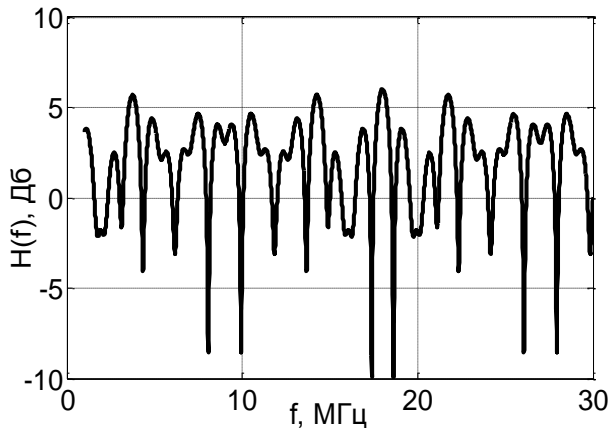


Рис. 4. Передаточна характеристика PLC каналу

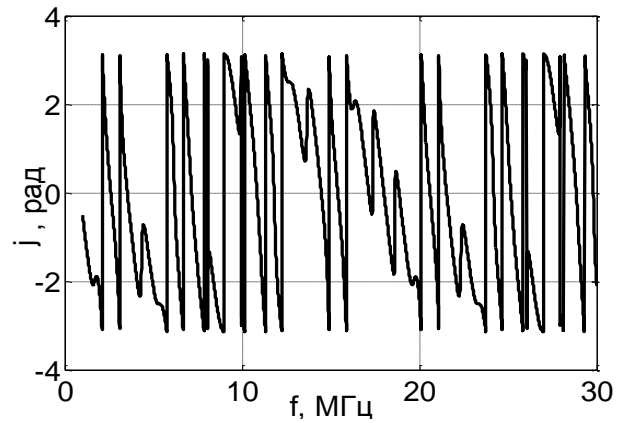


Рис. 5. Фазо-частотна характеристика PLC каналу

Результати моделювання ехо моделі для двопровідної лінії з матеріалу алюмінія наведено на рис. 6 – 7.

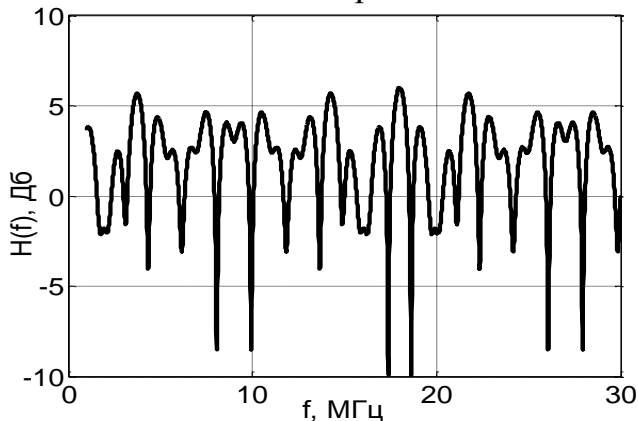


Рис. 6. Передаточна характеристика PLC каналу

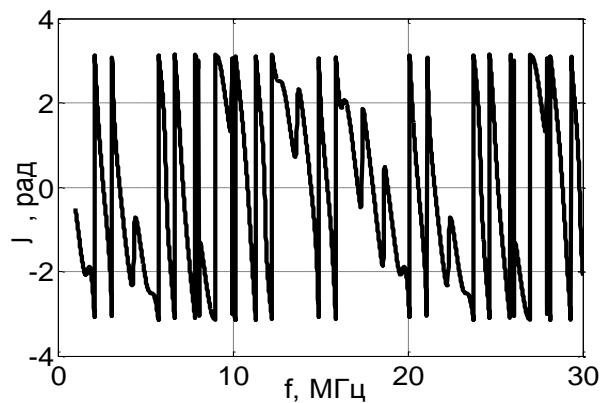


Рис. 7. Фазо-частотна характеристика PLC каналу

### Висновки

Виявлено, що передача даних в даному діапазоні частот можлива але на передаточній характеристиці присутні вузькосмугові затушення на певних частотах. Ці загасання пояснюються наявністю скруток в мережі, які визивають відбиття. Відбиття призводить до похибок при передачі даних. Тому, в PLC модемах необхідно застосовувати динамічне включення та вимкнення передачі сигналу на певних частотах. Тобто модем повинен здійснювати моніторинг каналу передачі з метою виявлення ділянки спектра з перевищенням певного порогового значення загасання. Також, для забезпечення необхідної завадостійкості, при проектуванні такої мережі, потрібно використовувати один з наступних методів модуляції: метод прямої послідовності (DS); метод частотних стрибків (FH); мультиплексування з ортогональним частотним розділенням (OFDM).

### Перелік посилань

1. Carcelle X. Power Line Communications in Practice / X. Carcelle — Boston, London, Artech House, 2006. — 330 p. — ISBN 13: 978-1-59693-335-4.

2. Hrasnica H. Broadband Powerline Communications / H. Hrasnica, A. Haidine, R. Lehnert. — Germany: Dresden University of Technology, 2004. — 275 p. — ISBN 0-470-85741-2.

3. Philipps H. Modelling of Powerline Communication Channels / H. Philipps // International Symposium on Power-line Communications and its Applications (ISPLC'99), 30 March — 1 April 1999, Lancaster UK, 1999. — P. 14—21.

4. Cheng D. K. Field and wave electromagnetics / D. K. Cheng. Addison, 1983. — 717p. — ISBN 0-201-01239-1.

5. Zuberi K. H. Powerline Carrier (PLC) Communication Systems / K. H. Zuberi. — Stockholm: Royal Institute of Technolog, 2003. — 108 p.

6. Cheng D. K. Fundamentals of Engineering Electromagnetics / D. K. Cheng. — Addison Wesley, 2003. — 501 p. — ISBN: 0-201-56611-7.

#### References

1. Carcelle X. (2006) *Power Line Communications in Practice*, London, Artech House, 2006, 330 p. ISBN 13: 978-1-59693-335-4.

2. Hrasnica H., Haidine A. and Lehnert R. (2004) *Broadband Powerline Communications*. Germany: Dresden University of Technology, 275 p. ISBN 0-470-85741-2.

3. Holger Philipps. Modelling of Powerline Communication Channels. *International Symposium on Power-line Communications and its Applications (ISPLC'99)*. Lancaster UK, 1999, pp. 14—21. ISBN 90-74249-22-1.

4. Cheng D. K. (1983) *Field and wave electromagnetics*. Addison, 717 p. ISBN 0-201-01239-1.

5. Zuberi K. H. (2003) *Powerline Carrier (PLC) Communication Systems*, Stockholm, Royal Institute of Technolog, 108 p.

6. Cheng D. K. (2003) *Fundamentals of Engineering Electromagnetics*. Addison Wesley, 501 p.

Онопа С. В., Березянський Б. М. Застосування «Ехо моделі» при проектуванні мереж передачі даних на основі мереж електроживлення. Розглянуті особливості застосування алюмінівої та мідної електропроводок в якості середовища для передачі даних із застосуванням технології PLC. Характеристики середовища отримані в широкій смузі частот за допомогою «ехо моделі». Приведені відповідні графіки результатів моделювання. Надані рекомендації при проектуванні мереж з використанням технології PLC.

**Ключові слова:** «Ехо модель», PLC, передача даних, широкопосмугові системи, спектральна характеристика, фазова характеристика, лінії електропередач, загасання, імпеданс.

Онопа С. В., Березянський Б. М. Применение «Эхо модели» при проектировании сетей передачи данных на основе сетей электропитания. Рассмотрены особенности применения алюминиевой и медной электропроводок в качестве среды для передачи данных с применением технологии PLC. Характеристики среды получены в широкой полосе частот с помощью «эхо модели». Приведены соответствующие графики результатов моделирования. Даны рекомендации при проектировании сетей с использованием технологии PLC.

**Ключевые слова:** «Эхо модель», PLC, передача данных, широкополосные системы, спектральная характеристика, фазовая характеристика, линии электропередач, затухание, импеданс.

*Onopa S. V. Berezianskiy B. M. The use of "Echo model" in the design of data communication system on power supply networks.*

*Introduction. Power supply network and research parameters for possible use as an environment of data transfer, considered in the broadband frequency range, are analyzed. The usage of "echo model" in research of electric grid features is the purpose of this work.*

*Description of the modeling. It is necessary to research the parameters of the electric grid: capacitance, inductance, conductance and conductor resistance, which are the initial data for modeling to study the proposed model. Consideration of the grid as multipath channel includes: a reflection signal which is present because of uncoordinated resistance and causes attenuation and signal delay. The transfer function of model considers all listed effects.*

*Conclusions. Modeling results are the graphical representation of the channel characteristics for copper and aluminum wires. Recommendations for the design of networks using the technology of PLC are given.*

*Keywords: «Echo model», PLC, data transmission, broadband systems, spectral response, phase response, power lines, attenuation, impedance.*