

УДК 621.371: 621.372: 621.315.1.052.63

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОПОРУ НАВАНТАЖЕННЯ ВІДГАЛУЖЕННЯ НА ЗАГАСАННЯ БУДИНКОВОЇ ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ

Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Яневич О.К.

*ДП «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку»,
65026, Україна, м. Одеса, вул. Буніна, 23.*

lashko@oniis.org.ua, lm@oniis.org.ua, toledo@oniis.org.ua

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ НАГРУЗКИ ОТВЕТВЛЕНИЯ НА ЗАТУХАНИЕ ДОМОВОЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДКИ

Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Яневич А.К.

*ГП «Одесский научно-исследовательский институт связи»,
65026, Украина, г. Одесса, ул. Бунина, 23.*

lashko@oniis.org.ua, lm@oniis.org.ua, toledo@oniis.org.ua

RESEARCH OF INFLUENCE OF BRANCH LOAD RESISTANCE ON HOUSE WIRING ATTENUATION

Lashko A.G., Lyakhovetskiy L.M., Yanevich A.K.

*SE "Odessa scientific research institute of communication",
23 Bunina str., Odessa, 65026, Ukraine.*

lashko@oniis.org.ua, lm@oniis.org.ua, toledo@oniis.org.ua

Анотація. Стаття присвячена дослідженню систем передачі (СП) Broadband over Power Lines (BPL) при роботі на вітчизняних мережах будинкової електропроводки. Об'єктом дослідження є компонент мережі будинкової електропроводки (МБЕ) – відгалуження. Раніше було розглянуто вплив відгалуження на загасання МБЕ у випадку навантажень типу обрив і коротке замикання (ХХ і КЗ). В статті досліджено вплив комплексного опору навантаження на загасання відгалуження. Для визначення робочого загасання відгалуження, що має комплексний опір навантаження, використана теорія ланцюгів. Виконано розрахунки та надано результати дослідження частотних характеристик загасання відгалуження, утвореного двожильними проводами типу ППВ з площею поперечного перерізу струмопровідних жил $1,5 \text{ мм}^2$ у діапазоні частот від 1 до 32 МГц. Здійснено порівняння частотних характеристик загасання відгалуження за наступними параметрами – ширина смуги пропускання, центральні частоти та загасання у суміжних смугах затримання, рознос між центральними частотами суміжних смуг затримання. Наведена умова досягнення максимальної ширини смуги пропускання та мінімального загасання відгалуження з навантаженням, що має комплексний опір. Запропоновано проводити корекцію частотної характеристики МБЕ шляхом впливу на опір навантаження.

Ключові слова: технологія BPL, широкосмуговий доступ по лініях електроживлення, система передачі, передавання даних, мережа будинкової електропроводки.

Аннотация. Статья посвящена исследованию систем передачи (СП) broadband over power lines (BPL) при работе по отечественным сетям домовой электропроводки. Объектом исследования является компонент сети домовой электропроводки (СДЭ) – ответвление. Раньше было рассмотрено влияние ответвления на затухание СДЭ в случае нагрузки типа обрыв и короткое замыкание (ХХ и КЗ). В статье исследовано влияние комплексного сопротивления нагрузки на затухание ответвления. Для определения рабочего затухания ответвления, которое имеет комплексное сопротивление нагрузки, применена теория цепей. Выполнены расчеты и приведены результаты исследования частотных характеристик затухания ответвления, образованного двухжильными проводами типа ППВ с площадью поперечного сечения токопроводящих жил $1,5 \text{ мм}^2$ в диапазоне от 1 до 32 МГц.

Осуществлено сравнение частотных характеристик затухания ответвления по следующим параметрам – ширина полосы пропускания, центральные частоты и затухание в смежных полосах задержки, разнос между центральными частотами смежных полос задержки. Приведено условие достижения максимальной ширины полосы пропускания и минимального затухания ответвления с нагрузкой, которая имеет комплексное сопротивление. Предложено проводить коррекцию частотной характеристики СДЭ путем влияния на сопротивление нагрузки.

Ключевые слова: технология BPL, широкополосный доступ по линиям электропередачи, система передачи, передача данных, сеть домашней электропроводки.

Abstract. This article is dedicated to research of broadband over power lines (BPL) transmission systems (TS) when working on domestic electrical wiring networks. The object of research is the component of domestic electrical wiring network (DEWN) – branch. The influence of the branch on DEWN attenuation in the cases of the idle and short type of load was reviewed previously. The influence of the complex load impedance on the branch operating attenuation is investigated in the article. The circuit theory is applied for this. Calculations are carried out and the results of research of frequency characteristics of attenuation of branch, formed with PPV type wire (the cross-sectional area of the conductor is $1,5 \text{ mm}^2$), in the range of 1 MHz to 32 MHz are given. The comparison of frequency branch attenuation characteristics is carried out on the following parameters: the passband width, the center frequencies and the attenuation in adjacent passbands, separation between center frequencies of adjacent bandwidths. The condition of achieving the maximum bandwidth and minimal attenuation of the branch with the load, that has complex impedance, is given. Carrying out the DEWN frequency characteristic correction by influencing to the load resistance is proposed.

Key words: BPL technology, broadband access over power lines, transmission system, data transmission, home electrical wiring network.

За останні двадцять років інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ) зробили значний крок уперед, глибоко інтегрувавшись у життя окремої людини і суспільства в цілому. На сьогоднішній день стрімко розвиваються такі взаємопов'язані концепції, як «розумний будинок» (Smart Home), «розумне місто» (Smart City), а також «Інтернет речей» (IoT). На кінець 2015 року нараховувалось 18,2 млрд. пристроїв, підключених до IoT. За прогнозами, на кінець 2020 року їх кількість становитиме 50,1 млрд. [1].

Велике значення у процесі розвитку ІКТ відіграє будівництво і модернізація мереж широкопasmового доступу (ШД). Найбільш поширеними технологіями ШД є:

- технології, основою для розгортання яких є мідний кабель (ADSL, SHDSL, VDSL, G.fast);
- технології, основою для розгортання яких є коаксіальний кабель (DOCSIS);
- технології, основою для розгортання яких є оптичний кабель (FTTH, FTTB, FTTP, FTTC);
- технології, основою для розгортання яких є мережі електроживлення (PLC);
- бездротові технології (HSPA, LTE, WiMAX, супутниковий зв'язок) [2].

Однією з технологій, яка застосовується при розгортанні «розумного будинку», є broadband over power lines (BPL) – різновид power line communication (PLC). Завдяки тому, що BPL працює по існуючій мережі будинкової електропроводки (МБЕ), вдається значно знизити витрати і час, необхідні для побудови мережі ШД. До переваг BPL також можна віднести і той факт, що в основі технології лежить метод передавання із застосуванням ортогональних гармонічних сигналів (ОГС), якому притаманна висока ефективність роботи по каналах зв'язку, що характеризуються ненормованими та швидкозмінними у часі характеристиками. До таких каналів належать, зокрема, і канали МБЕ [3].

Метою даної статті є дослідження впливу комплексного опору навантаження на загасання відгалуження, що входить до складу розгалуженої будинкової електропроводки і впливає на параметри передавання систем передачі, які працюють на мережах електроживлення.

Вплив комплексного опору навантаження на загасання МБЕ будемо розглядати на прикладі відгалуження, як одного з компонентів мережі.

У загальному випадку до складу розгалуженої МБЕ входить відгалуження, схема якого показана на рис. 1.

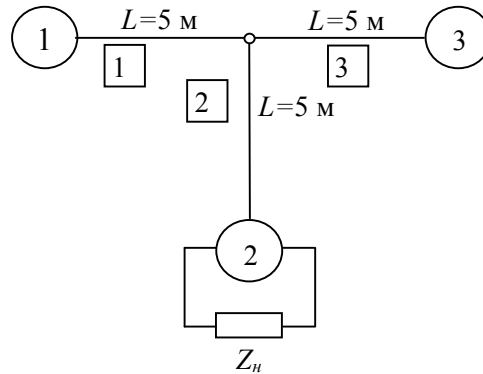


Рисунок 1 – Схема відгалуження будинкової електропроводки

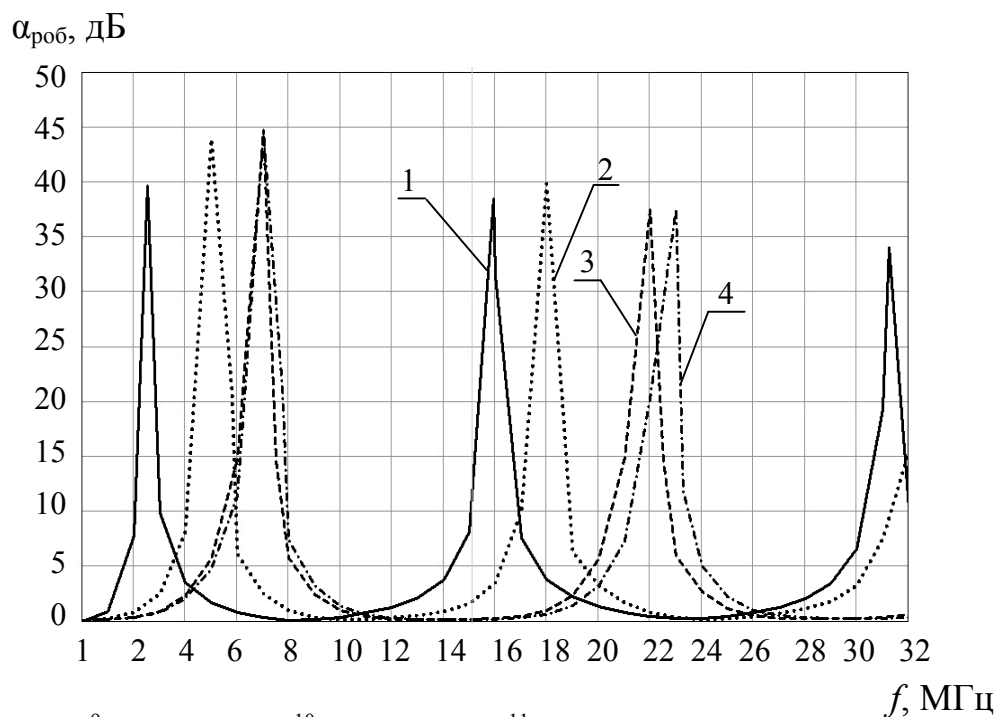
Схема відгалуження складається з трьох відрізків двожильного проводу ППВ 2 x 1,5 і однієї точки відгалуження та трьох полюсів. До полюса 2 підключене навантаження з опором Z_n . Відрізки проводів показані у вигляді пронумерованих ліній із зазначенням довжини, полюси – колами великого діаметра із порядковими номерами полюсів усередині, точка відгалуження – колом меншого діаметра.

Раніше [4] було розглянуто випадок навантаження відгалуження на опір типу КЗ, ХХ і узгоджений опір. Однак більшість навантажень реальної електропроводки мають комплексний опір. Тому далі буде розглянуто випадок навантаження, опір якого містить активний (R) і реактивний (ωL і/або $1/\omega C$) опори.

Еквівалентну схему відгалуження будинкової електропроводки (рис. 1) у напрямку 1...3 можна представити у вигляді каскадного з'єднання трьох чотиріполюсників – відрізок лінії довжиною l_1 , шлейф довжиною l_2 з навантаженням Z_n , відрізок лінії довжиною l_3 . Шлейф довжиною l_2 з навантаженням Z_n визначається у вигляді відрізка лінії малої довжини, між проводами якого включено вхідний опір.

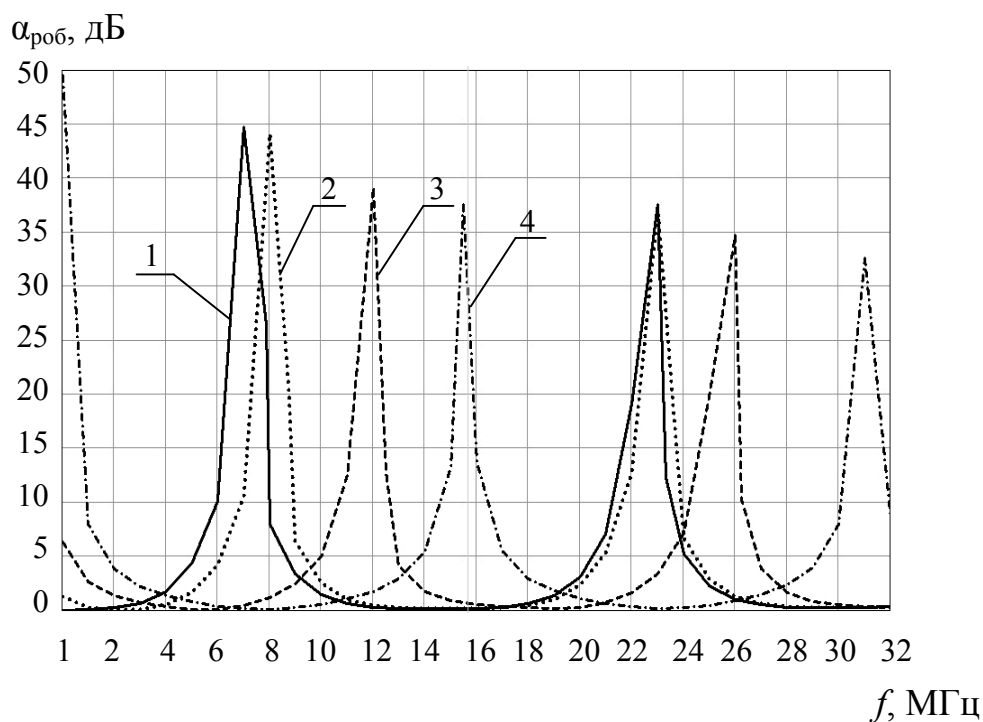
Для визначення параметрів передавання каскадного з'єднання трьох чотиріполюсників скористаємося методами теорії ланцюгів [5]. Для цього перемножимо матриці передавання трьох чотиріполюсників. Робочі загасання і фаза відгалуження визначаються за формулами, наданими у [4, 5, 6].

Для даної конфігурації відгалуження будинкової електропроводки (рис. 1), що складається з трьох відрізків проводу ППВ 2 x 1,5 довжиною 5 м та площею поперечного перерізу $1,5 \text{ мм}^2$, для деяких випадків комплексного опору навантаження були проведені розрахунки робочого загасання у діапазоні частот від 1 до 32 МГц, результати яких надано на рис. 2...6.



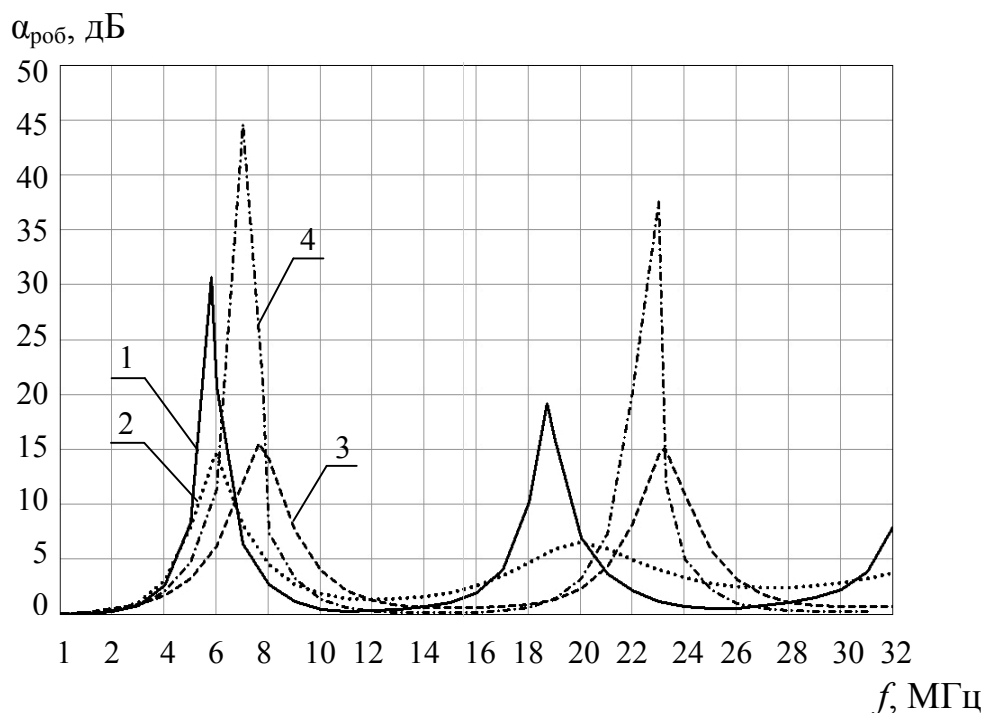
1 – $C = 10^{-9} \Phi$; 2 – $C = 10^{-10} \Phi$; 3 – $C = 10^{-11} \Phi$; 4 – XX

Рисунок 2 – Залежність робочого загасання від частоти (навантаження являє собою ємність)



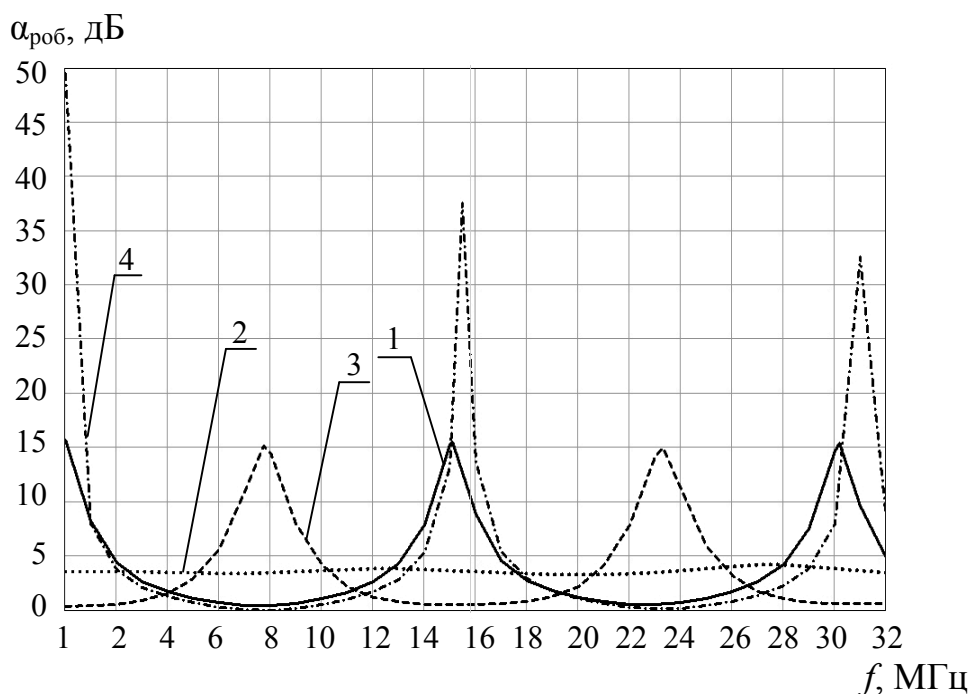
1 – $L = 10^{-4} \text{ Гн}$; 2 – $L = 10^{-5} \text{ Гн}$; 3 – $L = 10^{-6} \text{ Гн}$; 4 – КЗ

Рисунок 3 – Залежність робочого загасання від частоти (навантаження являє собою індуктивність)



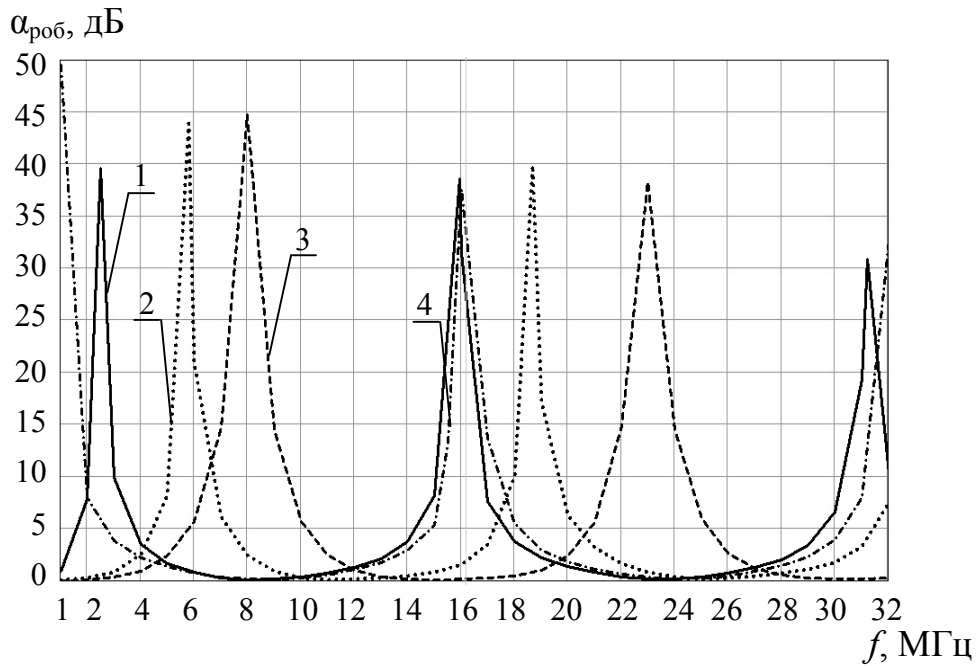
1 – $C = 10^{-10}$ Ф; $R = 10$ Ом; 2 – $C = 10^{-10}$ Ф; $R = 100$ Ом; 3 – $C = 10^{-10}$ Ф; $R = 1000$ Ом;
4 – XX

Рисунок 4 – Залежність робочого загасання від частоти (навантаження являє собою послідовно з'єднані ємність та активний опір)



1 – $L = 10^{-7}$ Гн; $R = 10$ Ом; 2 – $L = 10^{-7}$ Гн; $R = 100$ Ом; 3 – $L = 10^{-7}$ Гн; $R = 1000$ Ом;
4 – КЗ

Рисунок 5 – Залежність робочого загасання від частоти (навантаження являє собою послідовно з'єднані індуктивність та активний опір)



1 – $C = 10^{-10}$ Ф; $L = 10^{-9}$ Гн; 2 – $C = 10^{-10}$ Ф; $L = 10^{-10}$ Гн; 3 – $C = 10^{-10}$ Ф; $L = 10^{-11}$ Гн;
4 – КЗ

Рисунок 6 – Залежність робочого загасання від частоти (навантаження являє собою паралельно з'єднані ємність та індуктивність)

Для порівняння між собою частотних характеристик загасання відгалуження за різних комплексних опорів навантаження застосуємо наступні критерії – ширина смуги пропускання, центральні частоти суміжних смуг затримання, загасання на центральних частотах суміжних смуг затримання, рознос між центральними частотами суміжних смуг затримання. Результати розрахунку впливу опору навантаження на частотні характеристики загасання відгалуження будинкової електропроводки, що складається з трьох відрізків проводу ППВ 2 x 1,5 довжиною 5 м та площею поперечного перерізу 1,5 мм² надані в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку впливу опору навантаження на частотні характеристики загасання відгалуження будинкової електропроводки

Опір навантаження	Центральні частоти смуг затримання, МГц		Загасання на центральних частотах смуг затримання, дБ		Рознос між центральними частотами затримання, МГц	Ширина смуги пропускання*, МГц / %	Примітка
	перша	друга	перша	друга			
1	2	3	4	5	6	7	8
$R = 0$ (КЗ)	15,5	31	37	33	15,5	23,5/75,8	
$R = \infty$ (ХХ)	7	23	45	37	15	23,4/75,5	
$X = 1/j\omega C$ (конденсатор)	2,5	16	40	38	13,5	21,4/69	$C = 10^{-9}$ Ф
	5,1	18	43,4	40	12,9	21,7/70	$C = 10^{-10}$ Ф
	7	22	45	33	15	23/74,2	$C = 10^{-11}$ Ф

1	2	3	4	5	6	7	8
$Z = R + 1/j\omega C$ (послідовне з'єднання резистора та конденсатора)	5,9	18,8	31	19,5	12,9	23/74,2	$R = 10 \text{ Ом},$ $C = 10^{-10} \text{ Ф}$
	6	20	15	6,5	14	19,6/63,2	$R = 100 \text{ Ом},$ $C = 10^{-10} \text{ Ф}$
	7,8	23,3	15	15	15,5	21,7/68,7	$R = 1000 \text{ Ом},$ $C = 10^{-10} \text{ Ф}$
$X = j\omega L$ (індуктивність)	7	23	45	39	16	23/74,2	$L = 10^{-4} \text{ Гн}$
	8	23	44	37	15	23,2/74,9	$L = 10^{-5} \text{ Гн}$
	12	26	38	35	14	23,5/75,4	$L = 10^{-6} \text{ Гн}$
$Z = R + j\omega L$ (послідовне з'єднання резистора та індуктивності)	1	15	15	15	14	21,7/70	$R = 10 \text{ Ом},$ $L = 10^{-7} \text{ Гн}$
	3	12	3,5	4	9	**	$R = 100 \text{ Ом},$ $L = 10^{-7} \text{ Гн}$
	7,8	23,4	15	15	15,8	23,1/74,5	$R = 1000 \text{ Ом},$ $L = 10^{-7} \text{ Гн}$
$Z = j\omega L \cdot (1/j\omega C) / (j\omega L + 1/j\omega C)$ (паралельне з'єднання конденсатора та індуктивності)	2,5	16	39	38	13,5	20,9/67,5	$C = 10^{-10} \text{ Ф},$ $L = 10^{-9} \text{ Гн}$
	5,8	18,6	44	40	12,8	21/67,8	$C = 10^{-10} \text{ Ф},$ $L = 10^{-10} \text{ Гн}$
	8	23	45	40	15	22,5/72,7	$C = 10^{-10} \text{ Ф},$ $L = 10^{-11} \text{ Гн}$
Примітка. * – ширина смуги пропускання визначена у діапазоні частот, де загасання не перевищує 3 дБ. ** – загасання у смузі частот 1...32 МГц не перевищує 4,5 дБ.							

В результаті проведеного дослідження впливу комплексного опору навантаження на частотну характеристику загасання відгалуження у складі будинкової електропроводки у діапазоні частот 1...32 МГц було встановлено:

1) Навантаження типу КЗ і ХХ забезпечують приблизно однакову ширину смуги пропускання.

2) За наявності в опорі навантаження тільки реактивного опору (ωL і/або $1/\omega C$).

У випадку наявності у навантаженні малих величин ємності ($< 10^{-12} \text{ Ф}$) або індуктивності ($< 10^{-9} \text{ Гн}$) частотна характеристика загасання відгалуження майже збігається з частотною характеристикою відгалуження при навантаженні типу ХХ або КЗ відповідно.

При збільшенні величини індуктивності і/або ємності навантаження:

– відбувається зсув смуг затримання відносно характеристик навантаження типу КЗ чи ХХ;

– ширина смуги пропускання зменшується;

– центральні частоти сусідніх смуг затримання зрушуються в бік низьких частот.

У випадку наявності у навантаженні великих величин ємності ($> 10^{-6} \text{ Ф}$) або індуктивності ($> 10^{-2} \text{ Гн}$) частотні характеристики загасання відгалуження майже збігаються з частотними характеристиками відгалуження при навантаженнях типу КЗ або ХХ відповідно.

3) За наявності у складі опору навантаження послідовно включених активного (R) і реактивного (ωL і/або $1/\omega C$) опорів.

Збільшення величини активного опору призводить до:

- зсуву центральних частот сусідніх смуг затримання;
- зменшенню загасання на центральних частотах смуг затримання;
- зміни розносу центральних частот сусідніх смуг затримання;
- зміни ширини смуги пропускання.

4) Максимальна ширина смуги пропускання та мінімальне загасання відгалуження мають місце при рівності комплексного опору навантаження та хвильового опору проводу відгалуження, до якого підключено навантаження.

5) Результати дослідження можуть бути використані для корекції частотної характеристики загасання розгалуженої мережі електропроводки шляхом впливу на комплексне загасання навантаження.

У наступній статті автори планують надати результати дослідження впливу комплексного опору навантаження відгалуження на швидкість передавання даних по мережах будинкової електропроводки.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Internet of Things (IoT): number of connected devices worldwide from 2012 to 2020 (in billions) / [Електронний ресурс] / Statista. – Режим доступу: <http://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>. – Дата доступу: 22.08.2016. – Заголовок з екрану.
2. Wired Broadband Technologies / [Електронний ресурс] / European commission. – Режим доступу: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/broadband-technologies>. – Дата доступу: 30.08.2016. – Заголовок з екрану.
3. Балашов В.А. Системы передачи ортогональными гармоническими сигналами / В.А. Балашов, П.П. Воробийенко, Л.М. Ляховецкий. – М. : Эко-трендз, 2012. – 228 с.
4. Зелях Э.В. Двухполюсники и четырехполюсники: учеб. пособ. / Зелях Э.В. – Одесса : Изд. ОЭИС им. А.С. Попова, 1976. – 128 с.
5. Фельдштейн А.Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич. – М. : Связь, 1971. – 388 с.
6. Лашко А.Г. Визначення параметрів передавання між двома довільними полюсами розгалуженої будинкової електропроводки / А.Г. Лашко, Л.М. Ляховецький, О.К. Яневич // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2014. – № 1. – С. 102-107.

REFERENCES:

1. Internet of Things (IoT): number of connected devices worldwide from 2012 to 2020 (in billions) / [Електронний ресурс] / Statista. – Режим доступу: <http://www.statista.com/statistics/471264/iot-number-of-connected-devices-worldwide/>. – Дата доступу: 22.08.2016. – Заголовок з екрану.
2. Wired Broadband Technologies / [Електронний ресурс] / European commission. – Режим доступу: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/broadband-technologies>. – Дата доступу: 30.08.2016. – Заголовок з екрану.
3. Balashov V.A. Sistemy peredachi ortogonal'nyimi garmonicheskimi signalami / V.A. Balashov, P.P. Vorobienko, L.M. Lyakhovetskiy. – M. : Eko-Trendz, 2012. – 228 s.
4. Zelyach E.V. Dvukhpolyusniki I chetirechpolyusniki: ucheb. posob. / E.V. Zelyach. – Odessa. : Proc. of the O.S. Popov ONAT, 1976. – 128 s.
5. Feldshtein A.L. Sintez chetirechpolyusnikov I vos'mipolyusnikov yf SVCH / A.L. Feldshtein, L.R. Yavich. – M. Svyaz, 1971. – 388 s.
6. Lashko A.G. Determination of the parameters of transmission branched house wiring between two arbitrary poles / Lyakhovetskiy L.M., A.K. Yanevich // Proc. of the O.S. Popov ONAT "Scientific works". – 2014. – №1: pp. 102-107.