

ЯНЕВИЧ ОЛЕКСАНДР

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

e-mail: nevych.science@gmail.com**ТРИФОНОВА КСЕНІЯ**

Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку

e-mail: tryfksenia@gmail.com**КОВАЛЬОВ ОЛЕКСІЙ**

НТУ «Харківський політехнічний інститут»

e-mail: oleksii.kovalov.khpi.ua@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ІМПУЛЬСНИХ БЛОКІВ ЖИВЛЕННЯ НА ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАННЯ МЕРЕЖІ БУДИНКОВОЇ ЕЛЕКТРОПРОВОДКИ

Стаття присвячена дослідженню впливу імпульсних блоків живлення на робоче загасання та фазу робочої постійної передавання мережі будинкової електропроводки, побудованої з використанням вітчизняного проводу ШВВП в контексті розгортання технології Power Line Communications.

Ключові слова: power line communication, широкосмуговий доступ, параметри передавання, імпульсний блок живлення.

YANEVYCH OLEKSANDR, TRYFONOVA KSENIA

State university of intelligent technologies and telecommunications

KOVALOV OLEKSIY

NTU «Kharkiv Polytechnic Institute»

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF A SWITCHED-MODE POWER SUPPLY ON THE TRANSMISSION PARAMETERS OF A HOUSE ELECTRICAL WIRING NETWORK

The rapid growth in the number of smart devices equipped with wireless interfaces, and consequently, the emergence of mutual interference between them, drives the search for alternative interfaces that could be used in the deployment of smart home and smart city concepts. Most smart devices are equipped with a port for connection to an AC power network. In this context, a good decision is the use of PLC technology, which enables broadband access via household electrical wiring networks (HEWNs).

The design of access networks using PLC technology requires an understanding of how different types of loads affect the parameters of the signal propagation medium – HEWNs. This article is dedicated to studying the impact of the propagation constant of the HEWN. The obtained results were analyzed and compared with the characteristics for the case of a matched load (wave impedance), as well as for open-circuit and short-circuit load conditions. The influence of SMPS components is analyzed, with particular attention to the effect of the SMPS input filter on HEWN transmission parameters in the context of an HEWN fragment with a single branch, formed by wire segments of type SHVVP with a copper conductor cross-sectional area of 1.5 mm².

Using the method for determining transmission parameters, which considers the HEWN as a cascaded connection of two-port networks, calculations were performed for the insertion loss and phase of the propagation constant of the HEWN. The obtained results were analyzed and compared with the characteristics for the case of a matched load (wave impedance), as well as for open-circuit and short-circuit load conditions. The influence of SMPS power variation on the frequency characteristics of insertion loss and the phase of the propagation constant of the HEWN was also examined. The study was conducted for the frequency range from 0 to 30 MHz, corresponding to the 25 MHz – PB frequency band according to ITU-T Recommendation G.9964.

Keywords: power line communication, broadband access, transmission parameters, switched-mode power supply.

Стаття надійшла до редакції / Received 07.05.2025

Прийнята до друку / Accepted 06.06.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді, аналіз досліджень та публікацій

З огляду на стрімкий ріст попиту на автоматизацію побутових процесів та суттєве здешевлення «розумних» пристроїв, актуальними є питання, пов'язані з розвитком та впровадженням Інтернету речей (Internet of Things – IoT), а також концепції «розумний будинок» (Smart Home).

Згідно з прогнозами, викладеними в звіті IoT Analytics [1], загальна кількість підключених «розумних» пристроїв до 2030 року має зрости більш ніж в 2 рази – до 41,1 млрд. (станом на початок 2024 року – 18,8 млрд.).

На сьогодні значна частка «розумних» пристроїв (до 96%) обладнана безпроводовими інтерфейсами на кшталт 802.15.1 (Bluetooth) та 802.11 a/b/g/n/ac/ax (Wi-Fi). Це можна пояснити низькою вартістю безпроводових модулів, легкістю та швидкістю розгортання мережі, а також можливістю безперешкодного та швидкого масштабування концепції Smart Home. Втім, висока концентрація таких пристроїв на невеликій площі неминуче призводить до виникнення взаємних завад. Це є одним із чинників впливу на потенційне зростання частки підключених «розумних» пристроїв з проводним інтерфейсом з 4 до 9% до 2030 року [1, 2].

Оскільки більшість «розумних» пристроїв обладнані портом підключення до мережі електричного живлення змінного струму, альтернативою використанню безпроводових інтерфейсів є організація широкосмугового доступу за допомогою різновиду технології Power Line Communications (PLC) – Broadband over Power Lines (BPL). Дані технології [3, 4, 5, 6, 7] дозволяють організувати передавання даних існуючою мережею електроживлення, пропонуючи унікальне поєднання продуктивності, економічності та надійності.

Використання технологій PLC усуває потребу у побудові розгалуженої кабельної інфраструктури, що значно знижує початкові капітальні витрати та час розгортання мережі. Застосування ж методу передавання з використанням ортогональних гармонічних сигналів (ОГС), робить PLC стійкою до перешкод і здатною забезпечити очікувану продуктивність при роботі каналами зв'язку, що характеризуються ненормованими та швидкозмінними у часі характеристиками, задовольняючи потреби більшості «розумних» пристроїв [8, 9, 10].

Одним з основних параметрів системи передачі (СП) BPL є залежність робочого загасання та фази робочої постійної передавання мережі будинкової електропроводки (МБЕ) від частоти (далі – параметри передавання МБЕ). Раніше [11, 12] було розглянуто залежність робочого загасання від частоти та від довжини електричного проводу, а також від типу навантаження на відгалуженні МБЕ. Зокрема було досліджено вплив активного (R) та реактивного (L , C , LC) навантаження, а також їх комбінацій (послідовне з'єднання RL та RC) на відгалуженні МБЕ на робоче загасання МБЕ.

З огляду на широке поширення імпульсних блоків живлення (ІБЖ), важливим є дослідження впливу такого роду навантаження на параметри передавання МБЕ.

На сьогодні у науково-технічній літературі не освітлено питання залежності робочого загасання та фази робочої постійної передавання МБЕ від навантаження у вигляді ІБЖ на відгалуженні МБЕ, побудованої на основі широко поширеного вітчизняного кабелю типу ШВВП.

Формулювання цілей статті

Метою даної статті є дослідження залежності робочого загасання та фази робочої постійної передавання від навантаження на відгалуженні МБЕ у вигляді ІБЖ.

Виклад основного матеріалу

Розглянемо схему типового ІБЖ WX-DC2416 PSU [13] потужністю 150 Вт (рис. 1), що містить такі основні блоки:

1. Вхідний фільтр та випрямляч, до складу якого входять:

– конденсатори $C1$, $C2$, $C3$, призначені для фільтрації високочастотних імпульсів;

– дросель $L1$ у комбінації з конденсаторами $C4$, $C5$, що покликаний зменшувати електромагнітні завади;

– випрямляч $ZL1$, що перетворює змінну напругу величиною 220 В у постійну величиною 310 В;

– конденсатор $C6$, що згладжує випрямлену напругу.

– термістор $N1$, що обмежує струм заряджання конденсатора $C6$.

2. Комутаційний перетворювач (ШІМ-контролер та MOSFET):

– ключовий транзистор $Q1$ (SPP20N60C3, MOSFET) комутує струм.

– ШІМ-контролер $IC1$ (NCP1200P60G) – керує частотою імпульсів, стабілізує напругу на виході ІБЖ в тандемі з оптроном $U1$ (PC817), стабілізатором $TL431$ ($IC2$) та дільником напруги $R10$, $R11$, реалізуючи активну функцію корекції коефіцієнта потужності Power Factor Correction (PFC), зменшуючи різницю між споживаною активною та повною потужністю.

3. Трансформатор $T1$, що перетворює напругу та забезпечує ізоляцію та вторинний випрямляч $D3$, $D4$ (MBR2020CT) – діоди Шотткі з низьким падінням напруги, що забезпечують зменшення втрат та нагрівання.

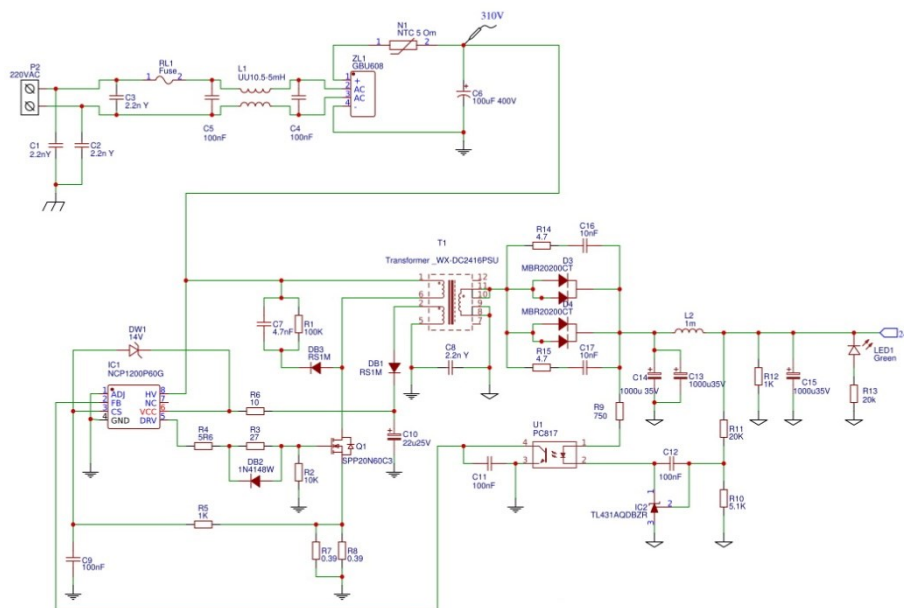


Рис. 1. Схема ІБЖ WX-DC2416 PSU

Кожний з наведених блоків ІБЖ чинить певний вплив на характеристики МБЕ.

Так, вхідний фільтр, під час увімкнення ІБЖ, є джерелом імпульсних стрибків струму, а також містить реактивні елементи, що, виступаючи навантаженням на відгалуженні МБЕ, здатні впливати на її параметри.

Ключовий транзистор комутаційного перетворювача MOSFET (Q1) працює у високочастотному режимі (близько 60 кГц), створюючи значну кількість гармонік. ШІМ-контролер, реалізуючи функцію PFC, чинить вплив на вхідний опір ІБЖ, роблячи його майже постійним і лінійним протягом періоду синуса. Таким чином вхідний опір ІБЖ може розглядатися як активне навантаження, яке змінюється в залежності від зміни потужності, що споживається навантаженням на виході ІБЖ. Описані процеси мають місце в діапазоні частот до 10 кГц і не чинять впливу на параметри СП ВРЛ.

Змінне магнітне поле трансформатора Т1 є потенційним джерелом індукованого шуму.

Крім того, ІБЖ генерує паразитні гармоніки частотою до 30 – 50 МГц.

Вплив ІБЖ на параметри МБЕ може бути змодельований через вплив на робоче загасання та фазу робочої постійної передавання МБЕ вхідного фільтра ІБЖ або ж, за його відсутності (що характерно для малопотужних ІБЖ), активного опору.

Розглянемо обидва наведені випадки. З огляду на досить широкий діапазон номінальних потужностей ІБЖ, доцільно проаналізувати вплив на характеристики МБЕ найбільш поширених із них. Вплив ІБЖ потужністю 5 Вт на параметри МБЕ змодельуємо через активний опір (R). Вплив ІБЖ потужністю 18 Вт – через вхідний фільтр у вигляді ємності з малим номіналом. Вплив ІБЖ з усіма іншими номіналами потужності розглядатимемо через вплив вхідного фільтра ІБЖ зі схемою, наведеною на рис. 1. Характеристики досліджуваних ІБЖ та їх вхідних фільтрів наведено у табл. 1. Всі блоки ІБЖ, що стоять за конденсатором С5 (рис. 1), представимо у вигляді активного опору, що характеризує середню споживану ІБЖ потужність.

Таблиця 1

Характеристики ІБЖ

Вхідний фільтр ІБЖ	Потужність ІБЖ, Вт				
	5,0	18,0	33,0	65,0	150,0
C , нФ	–	33,0	68,0	100,0	100,0
L , мГн	–	–	4,7	5,0	5,5
R , Ом	10580,0	2940,0	1603,0	814,0	353,0

Схема досліджуваного фрагменту МБЕ, наведена на рис. 2, містить наступні елементи: полюси (зображені у вигляді великих кіл із порядковими номерами в середині), відрізки проводу ШВВП (мідні струмопровідні жили з площею поперечного перетину $1,5 \text{ мм}^2$) довжиною $l = 5 \text{ м}$ (показані у вигляді пронумерованих ліній) та точка відгалуження (показана як нумероване коло). До полюсу 3 підключено навантаження Z_n .

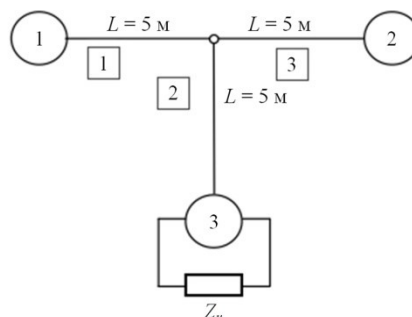


Рис. 2. Схема фрагменту МБЕ з одним відгалуженням

Згідно з методикою, описаною в [14], проведемо розрахунки значень робочого загасання (α) та фази робочої постійної передавання (φ) МБЕ за умови, що навантаженням на відгалуженні виступає вхідний фільтр ІБЖ, а також навантаження у вигляді активного опору (R), обриву (холостий хід – ХХ), хвильового опору ($Z_{\text{хв}}$), який для проводу ШВВП з площею поперечного перерізу мідних струмопровідних жил $1,5 \text{ мм}^2$ дорівнює 53 Ом та короткого замикання (КЗ). Розрахунки проведемо для діапазону частот від 0 до 30 МГц, що відповідає частотному діапазону 25 MHz – РВ (частотний план: 1,8 – 25 МГц) [15]. Результати розрахунку робочого загасання та фази робочої постійної передавання МБЕ наведено на рис. 3 та у табл. 2.

Порівнюючи отримані результати для параметрів передавання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді хвильового опору ($Z_{\text{хв}}$) та ІБЖ з різним номіналом потужності, необхідно відзначити, що:

1. Частотна характеристики робочого загасання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді $Z_{\text{хв}}$ має рівномірний характер і зростає в діапазоні від 2 до 27 МГц на 1,371 дБ. При цьому частотні характеристики робочого загасання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді вхідного фільтра ІБЖ та активного опору мають нерівномірності з перевищенням рівня робочого загасання за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді $Z_{\text{хв}}$ на частотах від 0,07324 МГц до 2,36816 МГц, від 13,30566 МГц до 17,91921 МГц та від 28,75976 МГц до 30,00048 МГц і далі з характерними піками на частотах: 0,366210937 МГц (33,239 дБ), 0,463867187 МГц (32,073 дБ), 0,659179687 МГц (30,888 дБ), та

15,60058594 МГц (до 20,100 дБ), а також від 5,51757 МГц до 10,03417 МГц та від 20,09961 МГц до 25,87890 МГц з максимумами на частотах 7,763671875 МГц (до 22,515 дБ) та 23,388671880 МГц (17,764 дБ) відповідно.

2. Частотна характеристика фази робочої постійної передавання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді $Z_{\text{хв}}$ має лінійний характер. При цьому частотні характеристики фази робочої постійної передавання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді вхідного фільтра ІБЖ та активного опору мають нелінійний характер з наростаючими відхилами від значень за умови навантаження у вигляді $Z_{\text{хв}}$, що досягають максимуму на наступних частотах:

– навантаження у вигляді вхідного фільтра ІБЖ: 0,488281 МГц (1,118 рад.), 0,830078 МГц (1,257 рад.) (18 Вт); 0,317383 МГц (1,294 рад.), 0,610352 МГц (1,213 рад.) (33 Вт); 0,244141 МГц (1,310 рад.), 0,537109 МГц (1,229 рад.) (65 Вт та 150 Вт); 15,039063 МГц (0,876 рад.), 16,137695 МГц (0,839 рад.) (для всіх номіналів ІБЖ). Стрибки відбуваються в діапазоні частот шириною 0,341797 МГц (18 Вт); 0,292969 МГц (33 Вт); 0,292968 МГц (65 Вт та 150 Вт); 1,098632 МГц (для всіх номіналів ІБЖ). Значення фази робочої постійної передавання МБЕ є найближчими до значення фази робочої постійної передавання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді $Z_{\text{хв}}$ на частоті 0,659179 МГц (18 Вт); 0,439453 МГц (33 Вт); 0,366210 МГц (65 Вт та 150 Вт); 7,788086 МГц, 15,600586 МГц та 23,388671 МГц (для всіх номіналів потужності ІБЖ);

– навантаження у вигляді активного опору: 7,250976 МГц (0,986 рад.), 8,251953 МГц (0,957 рад.), 22,753906 МГц (0,744 рад.), 23,999023 МГц (0,711 рад.). Стрибки відбуваються в діапазоні частот шириною 1,000977 МГц та 1,245117 МГц відповідно.

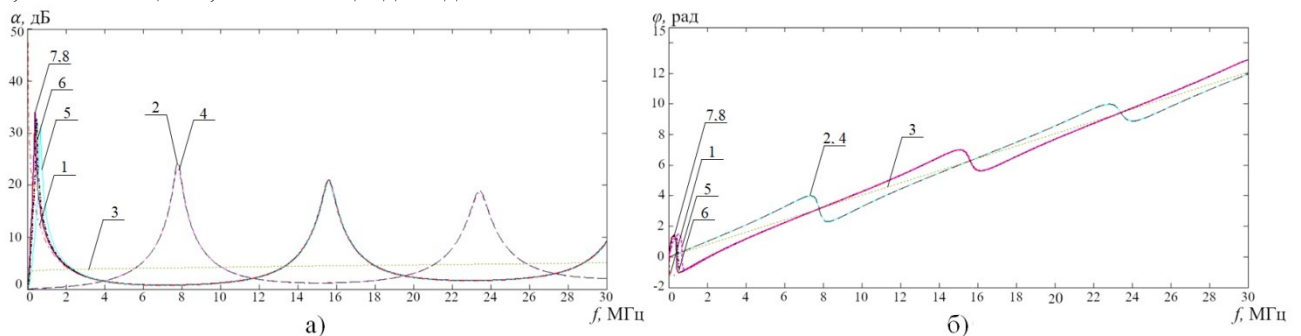


Рис. 3. Залежність робочого загасання МБЕ (а) та фази робочої постійної передавання МБЕ (б) від частоти за умови, що до відгалуження МБЕ підключене навантаження у вигляді: 1 – КЗ, 2 – ХХ, 3 – $Z_{\text{хв}}$, ІБЖ потужністю: 4 – 5 Вт; 5 – 18 Вт; 6 – 33 Вт; 7 – 65 Вт; 8 – 150 Вт.

Таблиця 2

Результати розрахунку робочого загасання МБЕ на вибраних частотах

f, МГц	Робоче загасання, дБ							
	$Z_{\text{хв}}$	ХХ	КЗ	Потужність ІБЖ, Вт				
				5,0	18,0	33,0	65,0	150,0
0,0	0,0	0,024	46,190	0,045	0,102	0,166	0,302	0,654
0,366210937	3,630	0,120	16,412	0,142	10,358	21,813	33,239	33,240
0,463867187	3,646	0,140	14,562	0,162	14,917	32,073	23,163	23,163
0,659179687	3,672	0,179	11,832	0,202	30,888	17,211	15,078	15,078
2,001953125	3,806	0,531	4,280	0,556	4,981	4,604	4,497	4,497
7,763671875	4,199	23,482	0,845	22,515	0,845	0,845	0,845	0,845
15,60058594	4,623	1,373	20,106	1,394	20,095	20,095	20,100	20,100
23,388671880	5,007	18,180	1,847	17,764	1,847	1,847	1,847	1,847
27,001953130	5,177	3,520	2,993	3,550	2,981	2,987	2,989	2,989
30,000488281	5,314	2,316	9,585	2,337	9,506	9,547	9,559	9,559

Висновки

В результаті проведеного дослідження впливу ІБЖ на параметри передавання МБЕ було встановлено:

1. ІБЖ вносить спотворення в частотну характеристику робочого загасання та фази робочої постійної передавання МБЕ.

2. Частотні характеристики робочого загасання та фази робочої постійної передавання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді вхідного фільтра ІБЖ з різними номіналами потужності є схожими за характером з частотними характеристиками, отриманими для навантаження відгалуження МБЕ у вигляді КЗ і забезпечують приблизно однакову ширину смуги пропускання з навантаженням відгалуження у вигляді ХХ.

3. Частотні характеристики робочого загасання та фази робочої постійної передавання МБЕ за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді активного опору є схожими за характером з частотними характеристиками, отриманими для навантаження відгалуження МБЕ у вигляді ХХ.

4. Спотворення в частотних характеристиках робочого загасання та фази робочої постійної передавання за умови навантаження відгалуження МБЕ у вигляді вхідного фільтра ІБЖ можна пояснити наявністю у складі вхідного фільтра ІБЖ ємності (С). Цей вплив добре простежується для ІБЖ з номінальними потужностями 65 Вт та 150 Вт, коли при рівному номіналі ємності та різних номіналах індуктивності та активного навантаження, частотні характеристики робочого загасання та фази робочої постійної передавання МБЕ практично повністю співпадають.

5. Результати дослідження впливу ІБЖ на параметри МБЕ можуть бути використані для прогнозування робочого загасання та фази робочої постійної передавання при роботі з різними конфігураціями та топологіями МБЕ.

В наступній статті планується надати результати дослідження впливу ІБЖ на швидкість передавання даних МБЕ.

Література

1. State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (дата звернення: 18.11.2024)
2. 5GHz vs 2.4GHz: weighing up Wi-Fi frequency bands. URL: <https://www.iotinsider.com/industries/communications/5ghz-vs-2-4ghz-weighing-up-wi-fi-frequency-bands/> (дата звернення: 19.11.2024)
3. L. N. Sastry Varanasi, Ankamma Rao Jonnalagadda, Sri Phani Krishna Karri. Smart Edge Device Utilizing Power Line Communication for Energy Management and Control of Electrical Appliances. IEEE Access, vol. 12, 2024, pp. 37207–37218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3373009>
4. G. López, J. Matanza, D. De La Vega, M. Castro, A. Arrinda, J. I. Moreno, and A. Sendin. The role of power line communications in the smart grid revisited: Applications, challenges, and research initiatives. IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 117346–117368. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928391>
5. What Is Power Line Communication (PLC). URL: <https://nessum.org/media/technology-blog/what-is-power-line-communication> (дата звернення: 21.11.2024)
6. Petrus A. Janse van Rensburg, Sanath Alahakoon, Jamshid Aghaei, Bradley P. Watkins, Mloyiswa P. Sibanda, Lam A. Bui, Kianoush Emami, Narottam Das, Shaminda de Silva. A Tutorial on Modem Coupling Circuits for Low-Voltage Power-Line Communications: Operating Principles, Trade-Offs, Design, and Safety. 2024, IEEE Access, vol. 12, pp. 159176-159201. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3479148>
7. Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines. Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe, John Newbury, Theo G. Swart. John Wiley & Sons, Ltd., 2010. 507 p.
8. Hybrid Wireless-Power Line Communication for Indoor IoT Networks. Xu Zhu, Kainan Zhu, Mohammad Heggo. Norwood, USA, 2020. 207 p.
9. A Practical Guide to Power Line Communications. C. Vlachou and S. Henri. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2022, 248 p.
10. Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid. Lutz Lampe, Andrea M. Tonello, Theo G. Swart. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 624 p.
11. Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Яневич О.К. Визначення параметрів передавання між двома довільними полюсами розгалуженої будинкової проводки. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2014, № 1, с. 102 – 107.
12. Лашко А.Г., Ляховецький Л.М., Яневич О.К. Дослідження впливу опору навантаження відгалуження на загасання будинкової електропроводки. Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. 2016. № 2. с. 72 – 79.
13. WX-DC2416 PSU. URL: <https://oshwlab.com/FrankCA/wx-dc2416-psu> (дата звернення: 03.02.2024)
14. Яневич О.К. Моделі та методи розрахунку характеристик систем передачі мережами електропроводки : дис. канд. тех. наук. 05.12.02 / Одеська державна академія зв'язку ім. О.С. Попова. Одеса, 2019. 195 с.
15. ITU-T Recommendation G.9964 (12/2023): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – Power spectral density specification. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9964-202312-I!!PDF-E&type=items (дата звернення: 12.03.2025).

References

1. State of IoT 2024: Number of connected IoT devices growing 13% to 18.8 billion globally. URL: <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/> (data zvernennia: 18.11.2024)
2. 5GHz vs 2.4GHz: weighing up Wi-Fi frequency bands. URL: <https://www.iotinsider.com/industries/communications/5ghz-vs-2-4ghz-weighing-up-wi-fi-frequency-bands/> (data zvernennia: 19.11.2024)
3. L. N. Sastry Varanasi, Ankamma Rao Jonnalagadda, Sri Phani Krishna Karri. Smart Edge Device Utilizing Power

- Line Communication for Energy Management and Control of Electrical Appliances. IEEE Access, vol. 12, 2024, pp. 37207–37218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3373009>
4. G. López, J. Matanza, D. De La Vega, M. Castro, A. Arrinda, J. I. Moreno, and A. Sendin. The role of power line communications in the smart grid revisited: Applications, challenges, and research initiatives. IEEE Access, vol. 7, 2019, pp. 117346–117368. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928391>
5. What Is Power Line Communication (PLC). URL: <https://nessum.org/media/technology-blog/what-is-power-line-communication> (data zvernennia: 21.11.2024)
6. Petrus A. Janse van Rensburg, Sanath Alahakoon, Jamshid Aghaei, Bradley P. Watkins, Mloyiswa P. Sibanda, Lam A. Bui, Kianoush Emami, Narottam Das, Shaminda de Silva. A Tutorial on Modem Coupling Circuits for Low-Voltage Power-Line Communications: Operating Principles, Trade-Offs, Design, and Safety. 2024, IEEE Access, vol. 12, pp. 159176-159201. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3479148>
7. Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines. Hendrik C. Ferreira, Lutz Lampe, John Newbury, Theo G. Swart. John Wiley & Sons, Ltd., 2010. 507 p.
8. Hybrid Wireless-Power Line Communication for Indoor IoT Networks. Xu Zhu, Kainan Zhu, Mohammad Heggo. Norwood, USA, 2020. 207 p.
9. A Practical Guide to Power Line Communications. C. Vlachou and S. Henri. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2022, 248 p.
10. Power Line Communications: Principles, Standards and Applications from Multimedia to Smart Grid. Lutz Lampe, Andrea M. Tonello, Theo G. Swart. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 624 p.
11. Lashko A.H., Liakhovetskyi L.M., Yanevych O.K. Vyznachennia parametriv peredavannia mizh dvoma dovilnymy poliusamy rozghaluzhenoi budynkovoï provodky. Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. 2014, № 1, s. 102 – 107.
12. Lashko A.H., Liakhovetskyi L.M., Yanevych O.K. Doslidzhennia vplyvu oporu navantazhennia vidhaluzhennia na zahasannia budynkovoï elektroprovodky. Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova. 2016. № 2. s. 72 – 79.
13. WX-DC2416 PSU. URL: <https://oshwlab.com/FrankCA/wx-dc2416-psu> (data zvernennia: 03.02.2024)
14. Yanevych O.K. Modeli ta metody rozrakhunku kharakterystyk system peredachi merezhamy elektroprovodky : dys. kand. tekhn. nauk. 05.12.02 / Odeska derzhavna akademiia zviazku im. O.S. Popova. Odesa, 2019. 195 s.
15. ITU-T Recommendation G.9964 (12/2023): Unified high-speed wireline-based home networking transceivers – Power spectral density specification. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.9964-202312-I!!PDF-E&type=items (data zvernennia: 12.03.2025).