

УДК 621.311

А. С. Бондарчук, канд. техн. наук,
Є. П. Нечипорук, ас.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУМУ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА ВТРАТИ АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Анотація. Надано оцінку впливу струмів вищих гармонік на втрати активної потужності в мережі житлового будинку, отриманої за допомогою аналізатора якості електроенергії Elspec G4500 та аналітичних розрахунків, що надає можливість прийняти, за необхідності, адекватні заходи щодо зменшення їх негативного впливу на електромагнітну сумісність у системі електропостачання.

Ключові слова: електромагнітна сумісність, гармоніки, моделювання, втрати, активна потужність, житловий будинок, електричні мережі.

А. С. Бондарчук, канд. техн. наук,
Є. П. Нечипорук, ас.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКОВ ВЫСШИХ ГАРМОНИК НА ПОТЕРИ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ЖИЛОГО ДОМА

Аннотация. Дана оценка влияния токов высших гармоник на активные потери мощности в электрических сетях жилого дома, полученной с помощью анализатора качества электроэнергии Elspec G4500 и аналитических расчетов, что дает возможность принять, при необходимости, адекватные меры по уменьшению их негативного влияния на электромагнитную совместимость в системе электроснабжения.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, гармоника, моделирование, потери, активная мощность, жилой дом, электрическая сеть.

A. S. Bondarchuk, Cand.Tech.Sci.,
E. P. Nechiporuk, as.

RESEARCH OF INFLUENCE OF CURRENTS OF THE HIGHEST HARMONICAS ON LOSSES ACTIVE POWER IN THE ELECTRIC NETWORK OF THE HOUSE

Abstract. The assessment of influence of currents of the highest harmonicas on active losses of the power in electric networks of a house received by means of the analyzer of quality of the electric power Elspec G4500 and analytical calculations that gives the chance to take, if necessary, adequate measures for reduction of their negative influence on electromagnetic compatibility in system of power supply is given.

Keywords: electromagnetic compatibility, harmonicas, losses, active power, dwelling house, electric network.

Вступ. Глобальну проблему викликає електромагнітна сумісність у системах електропостачання (СЕР) внаслідок широкого застосування сучасних побутових електроприладів з нелінійними характеристиками, що генерують, як відомо, вищі гармоніки. До таких приладів відносяться лінійні люмінесцентні лампи, енергозощаджувальні компактні люмінесцентні, світлодіодні лампи, персональні комп'ютери, кондиціонери, електронне устаткування, пристрої частотного регулювання електричного приводу вентиляторів, насосів, системи живлення від відновлювальних джерел – вітрових, сонячних електростанцій, оскільки вони збільшують втрати електричної енергії в електричній мережі,

побутових та інших електроприймачах, пришвидшують старіння ізоляції, викликають електромагнітні перешкоди, що впливатиме на інформаційну комп'ютерну та радіотехнічну електроносферу, викликає помилкове комерційне показання вимірювальних приладів, які розраховані для використання в колах із синусоїдальними струмами, або можуть викликати помилкове спрацьовування захисних апаратів, релейного захисту, що може призводити до зниження надійності електропостачання та суттєвих збитків на виробництві, зменшення пропускної спроможності ліній електропередавання, негативно впливатимуть на електромагнітну сумісність, навколишнє середовище [1 – 3].

Аналіз останніх досліджень та оприлюднень щодо проблеми. Впливу вищих гармонік на якість електричної енергії присвячено чимало досліджень, публікацій в наукових журналах, фундаментальних монографіях таких відомих учених як І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Саєнко, В. Г. Кузнецов, Е. Г. Курінний, Ю. Т. Разумний тощо, які містять глибоко розроблені теоретичні та практичні питання щодо електромагнітної сумісності в системах електропостачання, тобто здатність узгодженого функціонування між електричним пристроєм і його оточенням в даному електромагнітному середовищі без внесення надмірного збурювання у цю систему. Елементи нелінійних електроприймачів генерують електромагнітні перешкоди і одночасно є об'єктами їх впливу [1, 2].

Невирішена частина загальної проблеми. Разом із тим, у зазначених роботах висвітлено проблему тільки щодо потужних промислових нелінійних електроприймачів, таких як дугові сталеплавильні печі, зварювальні машини, перетворювачі частоти та ін. Поза достатньої уваги залишаються особливості емісії гармонік побутовими електроприладами, загальнобудинковими електроприймачами, їх вплив на самі ці об'єкти, елементи систем електропостачання житлових і комунальних об'єктів, внутрішньобудинкових електричних мереж тощо.

Мета статті. Розроблення методики та оприлюднення результатів дослідження шляхом моделювання процесів впливу струму вищих гармонік електричного навантаження сучасних побутових електроприладів житла, загальнобудинкових приймачів житлового будинку на втрати активної потужності в живильному кабелі, внутрішньобудинковій електричній мережі. Це дозволить приймати, в окремих випадках, адекватні заходи щодо підвищення якості електричної енергії до нормативних значень, зменшення втрат в елементах СЕП, електроприймачах, з урахуванням перспективного масового застосування потужного нелінійного побутового навантаження [4, 5].

Викладення основного матеріалу. Дослідження ґрунтується на моделюванні ди-

наміки електричних струмів основних електричних загальнобудинкових і приймачів житла та на результатах аналітичних розрахунках щодо втрат електроенергії. Електричне навантаження житлового будинку складається, як відомо, з навантаження побутових електроприладів житла (квартири) і загальнобудинкових електроприймачів.

За допомогою аналізатора якості електроенергії Elspec G4500 отримано динаміку електричного навантаження основних побутових електроприладів житла, будинку в цілому, живильному кабелі та вміст у них вищих гармонік у відсотковому відношенні до основної частоти 50 Гц [4].

За основу дослідження прийнято режими роботи електроприладів житла, які наведено в табл. 1.

Кожен із наведених нелінійних електроприладів генерує вищі гармоніки різної інтенсивності за спектром.

Наприклад, осцилограма миттєвих значень струму та параметрів і амплітудний спектр струму компактної люмінесцентної лампи (КЛЛ) наведено на рис. 1, 2.

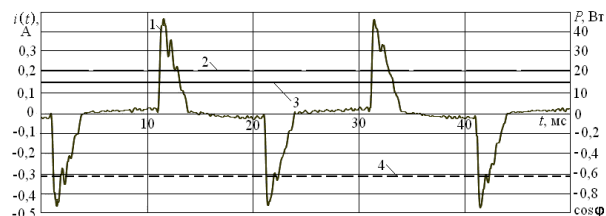


Рис. 1. Осцилограма струму (1) та параметрів КЛЛ потужністю 20 Вт:

- 2 – величини активної потужності;
- 3 – істинного (RMS) струму;
- 4 – значень $\cos \varphi$

Очевидно, що синусоїдальність струму суттєво спотворена через генерування КЛЛ вищих гармонік в електричну мережу житлового будинку. Динаміку цього струму можна розкласти в ряд Фур'є. Це дозволяє проводити теоретичний аналіз процесів, що відбуваються в електричних колах системи електропостачання.

Функцію, яка описує несинусоїдальну криву струму, можна розкласти в ряд синусоїдальних гармонічних складових із частото-

тою, які в n -раз перевищують частоту 50 Гц в електричній мережі, наприклад, частоту першої гармоніки $f_{n=1} = 50$ Гц, другої – $f_{n=2} = 100$ Гц і т. д. Із підвищенням частоти

амплітуда гармонік та їх дія змінюється, тому нормативними документами передбачається оцінювання всього ряду гармонічних складових від 2 до 40-ї включно [5].

Таблиця 1
Режими роботи основних побутових електроприладів житла

Найменування ЕП	Тип, марка	$P_{уст}$, Вт	Час ввімкнення ЕП, год, хв.	Час вимкнення ЕП, год, хв.
Освітлення	A55	60	17.20	–
Холодильник	Whirpool	144	17.20	–
Морозильник	Gorenje	150	17.20	–
Ноутбук	ProBook	60	17.20	–
ПК	Настільний	75	17.23	–
Пральна машина	Elektrolux	2200	17.23	18.30
Освітлення	Navigator	5×7	17.33	–
Телевізор	SAMSUNG	70	17.36	–
Кондиціонер	Sensei	880	17.53	–
Електрочайник (1 л)	TEFAL	2000	18.06	18.10
Праска	BRAUN	1900	18.16	18.28
Мікрохвильова піч	Samsung	850	18.51	18.56
Бойлер	Thermex	1500	18.58	19.48
Пральна машина	Elektrolux	2200	19.49	20.49
Електрочайник (1 л)	TEFAL	2000	20.35	20.39
Мікрохвильова піч	Samsung	850	20.41	20.46
Праска	BRAUN	1900	20.47	21.10

Функція струму $i(t)$ рядом Фур'є у тригонометричній формі має вигляд

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{40} I_{nm} \sin(n\omega t + \psi_k), \quad (1)$$

де I_0 – визначається як

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} i(t) dt, \quad (2)$$

де I_{nm} – результативне значення амплітуди n -ї гармоніки.

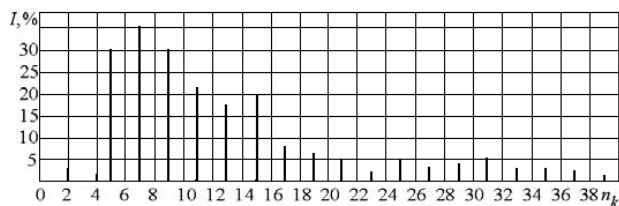


Рис.2. Амплітудний спектр струму КЛЛ потужністю 20 Вт

Відсотковий склад гармонік струму КЛЛ свідчить про його достатньо широкий спектр.

Джерелом генерування вищих гармонік є й світлодіодні (СВД) лампи, які генеруються як в період пуску, загорання та сталого режиму роботи (рис. 3, 4).

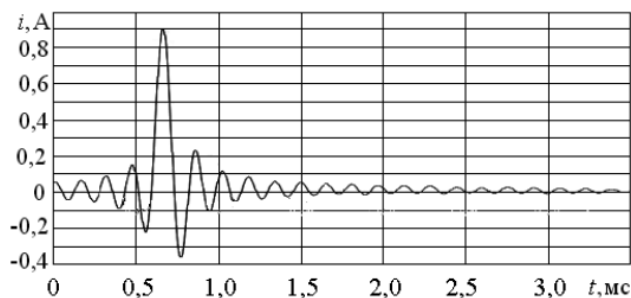


Рис. 3. Осцилограма пускового струму світлодіодного світильника типу LV-IL-30-600 потужністю 30 Вт

Вони викликають додаткові втрати електроенергії в електропроводці, кабелі, ізоляції, нагріваючи та скорочуючи термін їх експлуатації.

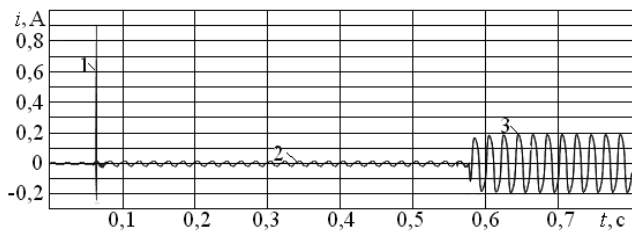


Рис. 4. Осцилограма струму пускового (1), запалення (2) та сталого режиму роботи (3) світильника типу LV-IL-30-600

Суттєве спотворення синусоїдальності струму викликають кондиціонери (рис. 5).

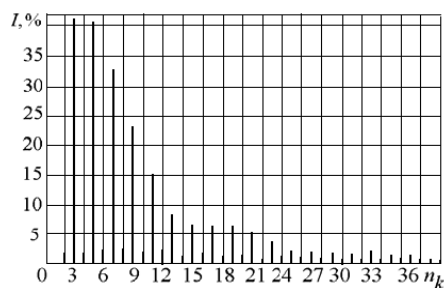


Рис.5. Амплітудний спектр гармонік струму кондиціонера серії SENSEI ECO FTE-23MR

Відомо, якщо кількість нелінійних ЕП за потужністю перевищує значення 25 % від підсумкової потужності об'єкта, то можливе недопустиме перегрівання нульових робочих провідників через наявність вищих гармонічних складових струму в електричних мережах, які потрібно враховувати при виборі перерізу струмопровідних частин.

На рис. 6 наведено осцилограми характерного вечірнього електричного навантаження ЕП житла з газовою плитою протягом 3 год 45 хв. (час 0 умовно приймається за 17 год 20 хв.), як найбільш навантажений побутовими приладами.

Механізм фіксації значень вимірювального струму в аналізаторі якості електроенергії Elspec G4500 істинного RMS-струму (HRMS – вищих гармонік) полягає в тому, що він реагує на квадрат миттєвого значення струму кола, усереднює його за певний проміжок часу та виводить на дисплей значення квадратного кореня з цього усередненого значення [5].

За результатами вимірювання вмісту в електричній мережі житла, струми гармонік 2, 3, 5, 7-ї становлять близько 4, 10, 5, 2 % відповідно, а інших гармонік, до 40-ї – менше, ніж 1 %.

Додаткові втрати активної потужності від усіх струмів вищих гармонік в провіднику електричної мережі орієнтовно визначаються за формулою [2]

$$\Delta P_{\text{мер}}^{(i)} = r_0 l_i \sum_{n=2}^m I_n^2 \sqrt{n}, \quad (3)$$

де r_0 – питомий активний опір i -ї ділянки провідника мережі, Ом / м;
 l_i – довжина i -ї ділянки провідника мережі, що живить нелінійний ЕП, м;

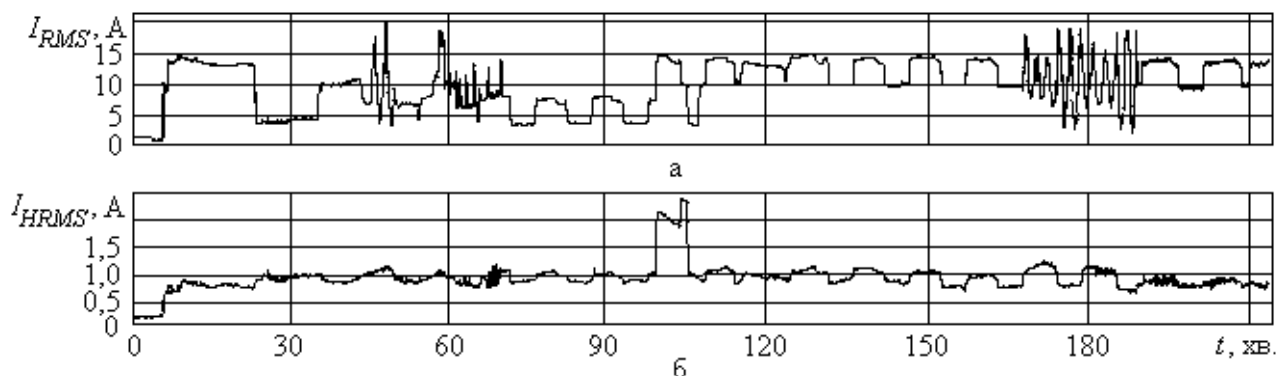


Рис. 6. Осцилограми RMS-струму (а) та HRMS-струму (б) електричного навантаження ЕП на ввіді житла (квартири)

m – найбільша значуща ($\geq 0,01I_1$) гармоніка, що генерує нелінійний ЕП;

I_n – величина струму значущої n -ї гармоніки, що генерує нелінійний ЕП, А.

З урахуванням того, що перетин електропроводки становить $1,5 \text{ мм}^2$ із мідних проводів внутрішньоквартирної електричної мережі від квартирної щитка до зазначених ЕП, додаткові втрати активної потужності за наявності вищих гармонік, за попередніми розрахунками, збільшаться на 2,63 % відносно втрат за основної частоти 50 Гц.

Результати вимірювання значень вищих гармонік струму за фазами A , B , C та в нейтралі N кабелю, що живить 144-квартирний будинок, наведено в табл. 2 і на рис. 7.

Значення RMS -струму 1-ї гармоніки за фазами A , B , C та нейтралі N живильного

кабелю становлять 104,5, 124,8, 106,1, 65,6 А відповідно.

Живильний кабель напругою 0,4 кВ з алюмінієвими жилами перерізом $4 \times 95 \text{ мм}^2$ від внутрішньоквартальної понижувальної підстанції до відно-розподільного пристрою 144-квартирного будинку має довжину 60 м і в будинку – кабель з алюмінієвими жилами перерізом $4 \times 35 \text{ мм}^2$.

Основними заходами щодо усунення (зменшення) та дії вищих гармонік на електромагнітну сумісність в системах електропостачання є такі:

- живлення нелінійного електричного навантаження від окремих трансформаторів або секцій;
- застосування перетворювачів із високою пульсністю;
- приєднання до потужної СЕП;
- застосування фільтрів та ін.

Таблиця 2
Результати виміру складу гармонік в живильному кабелі

Гармоніки	Усереднене значення гармонік за фазами та в нейтралі кабелю, %			
	A	B	C	N
3-я	8,044	23,484	7,794	35,752
5-а	3,486	5,135	3,452	4,343
7-а	1,377	2,267	1,064	2,286
9-а	1,092	2,295	0,937	2,758

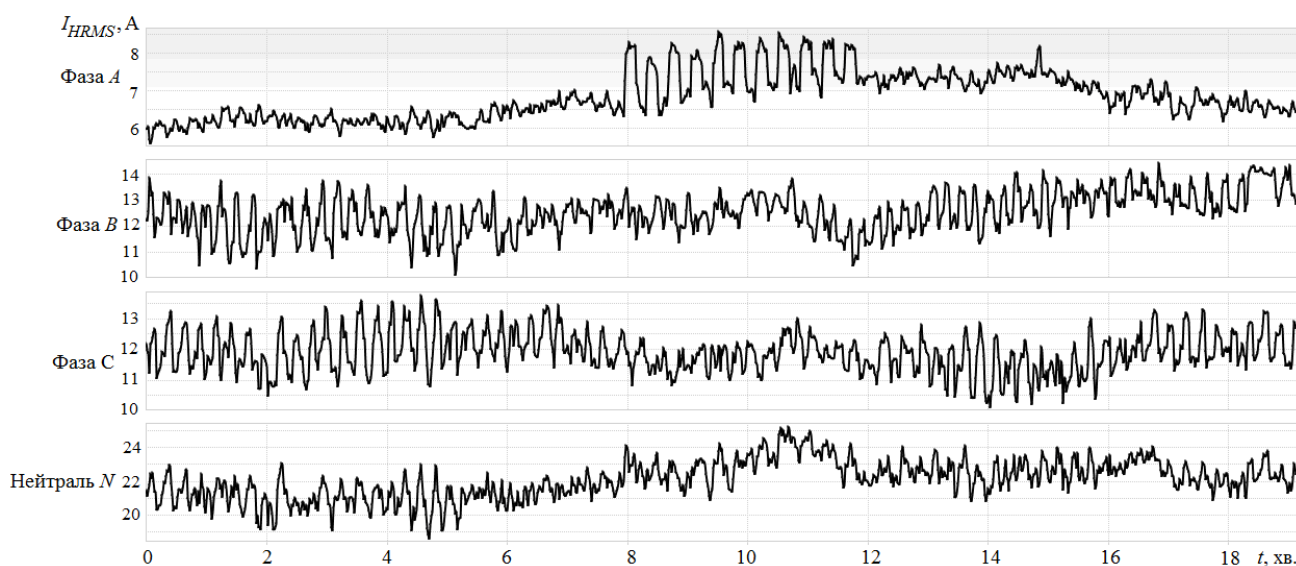


Рис. 7. Осцилограми HRMS-струмів за фазами A , B , C і нейтралі N електричного навантаження кабелю на ввіді 144-квартирного 9-поверхового будинку

За попередніми розрахунками збільшення втрат активної потужності, за рахунок генерації нелінійними електроприймачами вищих гармонік в живильному кабелі та електричній мережі будинку, становить близько 7,3% відносно втрат за основної частоти.

Висновки за результатами дослідження та перспективи його розвитку. Методика та отримані результати дослідження є підґрунтям для оцінки впливу побутових електроприладів, загальнобудинкових приймачів на збільшення втрат активної потужності в мережі через генерацію вищих гармонік. Важливим напрямом подальшого наукового дослідження за цієї теми полягає в оцінці втрат активної потужності від вищих гармонік в трансформаторах, електричних двигунах, перетворювачах та інших електроприймачах, елементах систем електропостачання.

Список використаної літератури

1. Жежеленко, І. В. Електромагнітна сумісність у системах електропостачання [Текст] / І. В. Жежеленко, А. К. Шидловський, Г. Г. Півняк, Ю. Л. Саєнко. – Дніпропетровськ: НГУ, 2009. – 319 с.
2. Разумний, Ю. Т. Ефективне використання електроенергії та палива [Текст] / Ю. Т. Разумний, А. В. Рухлов, Н. Ю. Рухлова. – Дніпропетровськ: НГУ, 2014. – 223 с.
3. Бондарчук, А. С. Внутрішньобудинкове електропостачання [Текст] / А. С. Бондарчук. – К.: Освіта України, 2015. – 480 с.
4. Портативні аналізатори якості електроенергії [Електронний ресурс]. Available at: [www/URL:http:http://www.nik.net.ua/ru/category/Quality-Analyzer-Elspec-G4500-3500](http://www.nik.net.ua/ru/category/Quality-Analyzer-Elspec-G4500-3500). (accessed 12.01.2016).
5. Денисюк, С. П. ISO 50001: Цілі стандарту та особливості його впровадження в Україні [Текст] / С. П. Денисюк. – К.: СІК ГРУП, 2015. – 208 с.

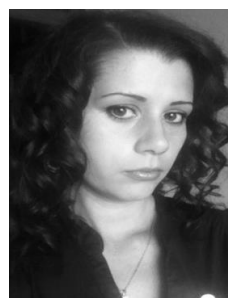
Отримано 25.02.2016

References

1. Zhezhelenko, I. V. Electromagnitna sumisnist y sistemah electropostachannia [Electromagnetic compatibility in the systems of electric supply] / A. K. Shidlovskiy, G. G. Pivnyak, Yu. L. Sayenko. – Dnipropetrovsk: NGU, 2009. – 319 p. (*In Ukrainian*).
2. Razumnyi, Yu. T. Efectyvne vycorystanna electroenergii ta palyva [Effective the use of electric energy and fuel] / Yu. T. Razumnyi, A. V. Rukhlov, V. M. Prokuda, N. Yu. Rukhlova. – Dnipropetrovsk: NGU, 2014. – 223 p. (*In Ukrainian*).
3. Bondarchuk, A. S. Vnutrishnobudyncove electropostachanna [Inwardly house's electric supply] / A. S. Bondarchuk. – K.: Osvita Ukraine, 2015. – 480 p. (*In Ukrainian*).
4. Portatyvni analizatory yacosti electroenergii Elspec G4500 [Portable analyzers of quality of the electric power Elspec G4500]. 2007. Available at: [www/URL:http:http://www.nik.net.ua/ru/category/Quality-Analyzer-Elspec-G4500-3500](http://www.nik.net.ua/ru/category/Quality-Analyzer-Elspec-G4500-3500). (*In Russian*) (accessed 12.01.2016).
5. Denisuk, S. P. ISO 50001: Cili standartu ta osoblyvosti jogo vprovadgennia v Ukraine [Aims of standard and feature of his introduction are in Ukraine] / S. P. Denisuk. – K.: SIKGROUP, 2015. – 208 p. (*In Ukrainian*).



Бондарчук
Анатолій Сергійович,
канд. техн. наук,
доцент кафедри
електропостачання
та енергетичного
менеджменту,
ІЕЕ, ОНПУ,
тел. (048)734-86-90
E-mail: asb@te.net.ua



Нечипорук
Евгенія Павловна,
маг., ас. кафедри
електропостачання
та енергетичного
менеджменту,
ІЕЕ, ОНПУ,
тел. (048)34-68-55
E-mail: ENF2110@mail.ru