

Н. Б. Бурдейна, Я. А. Підлісний

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНІЧНІ ЗАСОБИ НОРМАЛІЗАЦІЇ РІВНІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ НАДНИЗЬКОЇ ЧАСТОТИ

Анотація. Досліджено основні підходи по нормалізації електромагнітної обстановки у будівлях і спорудах загального призначення. Визначено, що найбільш поширені резонансні системи одночасної компенсації реактивної потужності і придушення вищих гармонік та інтергармонік електричного струму (напруги) промислової частоти неефективні за наявності складного спектра гармонік та інтергармонік. Експериментально визначено, що у сучасних будівлях і спорудах з великою кількістю електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками спектр інтергармонік, у тому числі й субгармонік, складний і непередбачуваний. Показано, що сучасні універсальні системи придушення гармонік та інтергармонік мають високу вартість й доцільні для застосування на підприємствах з високими електроспоживаннями для заощадження енергії. Запропоновано схему придушення гармонік та інтергармонік електричного струму промислової частоти зі зворотними зв'язками з використанням трансформатора. Такий підхід доречний для непередбачуваних змін гармонічного складу напруги у системі електроживлення. Показано, що генерація інтергармонік можлива й у будівлях з відносно невеликим внеском нелінійних електроспоживачів у загальне навантаження. Інтергармоніки можуть генеруватися внаслідок модуляційних явищ у процесах падіння напруги при вмиканні потужних електроспоживачів. Надано порядок розроблення організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки на основі електромагнітного моніторингу. Наголошено, що на першому етапі таких робіт необхідно забезпечити рівномірність навантаження на окремі фази силової електромережі, провести повну ревізію систем компенсації реактивної потужності та ліквідацію електричних струмів витоку.

Ключові слова: електромагнітна безпека, гармоніки, інтергармоніки, електромагнітний моніторинг

Вступ

У більшості будівель і споруд громадського призначення та у побутовому середовищі головним електромагнітним чинником впливу на людей є електромагнітні поля наднизької частоти, в основному промислової частоти 50 Гц. В останнє десятиріччя у будівлях будь-якого призначення збільшується кількість та щільність розташування електричного та електронного обладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками. У результаті його експлуатації відбувається генерація гармонік та інтергармонік електромагнітного поля промислової частоти. Амплітудні значення гармонік та інтергармонік непередбачувані та змінюються у просторі і часі, що призводить до підвищення електромагнітного фону непередбачуваним чином. Зниження рівнів таких полів традиційними засобами екранування неможливе через квазістаціонарність таких полів. Тому доцільно дослідити можливості максимального зниження рівнів електромагнітних полів наднизької частоти за рахунок розроблення і впровадження організаційно-технічних заходів з придушення генерації гармонік та інтергармонік електричного струму промислової частоти.

Огляд літературних джерел. Рівні електромагнітних полів промислової частоти регламентуються в Україні для виробничих умов санітарними нормами [1], а для побутових умов – нормативом [2]. Але вони не розглядають рівні гармонік та інтергармонік. Тобто, вимірювання значень електричної та магнітної складових електромагнітного поля промислової частоти дає формальні підстави робити висновок про

стан електромагнітної обстановки щодо полів наднизької частоти. Рівні гармонік електричного струму (напруги) промислової частоти регламентуються низкою міжнародних стандартів з електромагнітної сумісності серії 61000, наприклад [3], які набули чинності в Україні методом підтвердження у 2016 р. Більшість досліджень у цьому напрямі спрямовані на зниження втрат електроенергії й стосуються енергоємних підприємств, таких, як дугові сталеплавильні печі. Такі споживачі спотворюють синусоїдальність напруги, і крім втрат енергії негативно впливають на роботу силових трансформаторів. Ця проблематика й основні підходи до вирішення задач зниження рівнів гармонік розглянуто у фундаментальній роботі [4]. У роботах [5, 6] наголошується, що магнітні поля гармонік промислової частоти можуть мати гігієнічне значення. Але засобом зниження їх впливу на працюючих пропонується обмеження внеску нелінійних споживачів у загальне електроспоживання до 20–25 %. На поточному етапі розвитку електротехніки та електроніки це не завжди можливо. Такий підхід доцільний, коли у будівлі з трифазною системою електроживлення експлуатуються комп'ютери малої потужності. У дослідженні [7] фактично уточняється відносний внесок у енергоспоживання нелінійних споживачів, за якого вплив магнітних полів гармонік промислової частоти можна вважати некритичним. У роботі [8] показано, що найбільш доцільним є одночасна компенсація реактивної потужності й придушення гармонік промислової частоти. Перевагою дослідження є оцінка ефективності фільтрокомпенсуючих пристроїв у залежності від характеристик електричного струму, кількості й густини гармонік та

інтергармонік). Це дослідження може бути основою для вирішення задач електромагнітної безпеки у будівлях масового використання. Як зазначалося вище, більшість розробок стосуються підприємств з великим електроспоживанням та відповідними втратами енергії. Тому застосування складних фільтрокомпенсуючих систем великої вартості виправдане у [9]. Але у більшості будівель і споруд головну увагу доцільно приділити амплітудним значенням гармонік та інтергармонік з точки зору електромагнітної безпеки. Це дозволить обрати найбільш прийнятний спосіб придушення гармонічних спотворень напруги живлення й забезпечити рівень електромагнітної безпеки на принципах розумної достатності.

Мета роботи – визначити перелік та вміст організаційно-технічних заходів з електромагнітної безпеки в умовах впливу електромагнітних полів наднизької частоти.

Викладення основного матеріалу

Задачі, пов'язані зі зниженням рівнів магнітних полів частот вищих гармонік та інтергармонік промислової частоти можна вирішити за рахунок зниження електричних струмів цих частот у силовій електромережі будівлі. Фактично це задача забезпечення максимальної синусоїдальності електричного струму. Це реалізується одночасно з компенсацією реактивної потужності у мережі за рахунок застосування резонансних фільтрів. Найбільш прості системи придушення вищих гармонік та інтергармонік розглянуто у [8] та визначено їх переваги та недоліки. Схематично ці системи наведено на рис. 1.

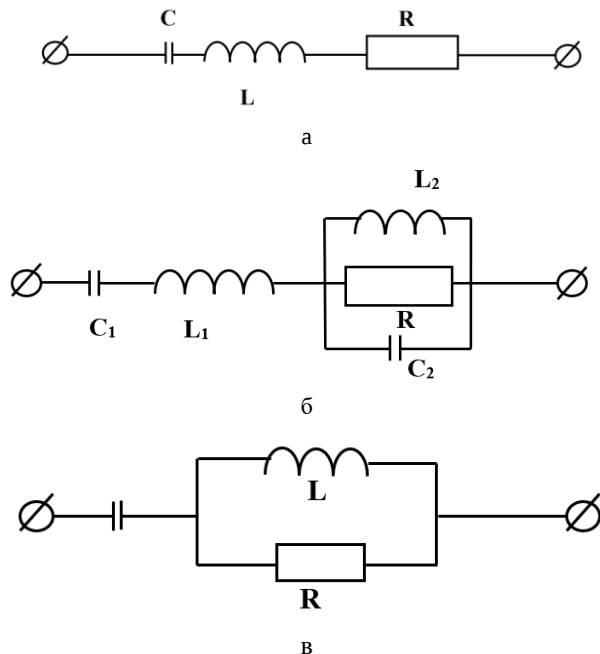


Рис. 1. Схеми резонансних фільтрокомпенсуючих пристроїв: а – резонансний фільтр, б – дворезонансний фільтр, в – демпферувальний фільтр

Резонансний фільтр налаштований на одну частоту й «не помічає» інші гармонічні спотворення електроживлення. Якщо гармонік декілька, то можливо застосовувати, наприклад, дворезонансний фільтр. У

разі певного спектра інтергармонік застосовуються демпферувальні фільтри. Але у реальних умовах експлуатації будівлі ці параметри можуть змінюватися у залежності від кількості нелінійних електроспоживачів, які підключені до силової мережі у даний момент. Крім того, можливі певні зміни навантаження на окремі фази трифазної силової електромережі (перекос фаз).

За великих відносних значень електроспоживання нелінійних навантажень, більше 25 %, спектральний склад магнітного поля гармонік та інтергармонік може бути дуже складним (рис. 2).

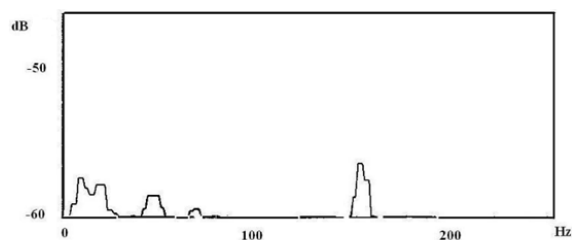


Рис. 2. Спектральний склад електромагнітного поля наднизької частоти у будівлі з великою кількістю нелінійних споживачів

Рис. 2 не надає абсолютних значень напруженості магнітних полів, але свідчить, що значення третьої гармоніки та субгармонік (частот, нижчих за основну) перевищують значення магнітного поля частотою 50 Гц.

За таких умов при формальному контролі електромагнітної обстановки стандартним приладом не враховуються магнітні поля напруженостями, вищими за напруженість поля частотою 50 Гц.

Експериментальні дослідження свідчать, що такі відхилення мають системний характер. На рис. 3 наведено спектральний склад магнітного поля у приміщенні з великою кількістю комп'ютерної техніки.

Термін «комп'ютерна техніка» включає у себе друкуючі і копіювальні пристрої, джерела безперебійного живлення тощо. Тому у залежності від кількості й типів технічних засобів, які працюють одночасно, залежить й спектральний склад магнітного поля. Слід відзначити, що поля різних гармонік та інтергармонік генеруються відповідними електрострумами, які протікають нульовими робочими провідниками трифазної силової електромережі. Це добре відомо електротехнікам, але не враховується при розробленні та впровадженні заходів електромагнітної безпеки.

Наведені на рис. 3 значення магнітного поля невеликі, але гранично допустимі рівні магнітного поля у частотній смузі 5 Гц – 2 кГц складають 250 нТл, тому навіть магнітне поле частотою 50 Гц перевищує це значення, $1 \text{ А/м} = 1,26 \text{ мкТл}$.

Слід зазначити, що закономірності у появі інтергармонік не виявлено. У багатьох випадках субгармоніка частотою 12,5 Гц перевищує субгармоніку 25 Гц. З'являється інтергармоніка частотою 75 Гц. Але усе це свідчить про системність проблеми.

У таких умовах пристрої придушення гармонік та інтергармонік електричного струму промислової

частоти повинні бути динамічними й реагувати на фактичні зміни гармонічного складу електричного струму (напруги) у силовій мережі. Такий фільтро-

компенсуючий пристрій повинен мати зворотні зв'язки. Принципова схема такого пристрою наведена на рис. 4.

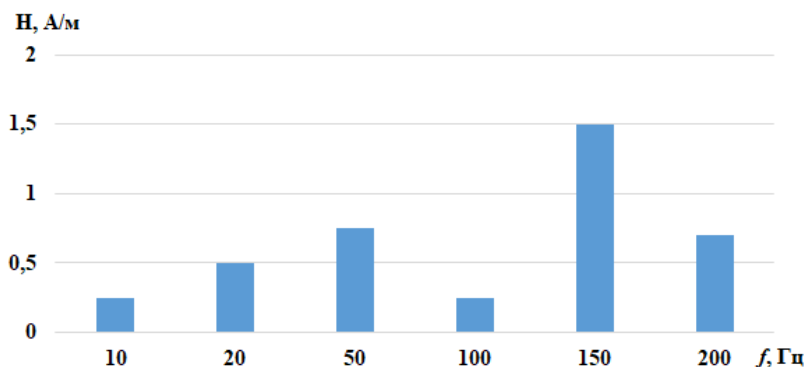


Рис. 3. Напруженості магнітного поля наднизької частоти у приміщенні з великою кількістю комп'ютерної техніки

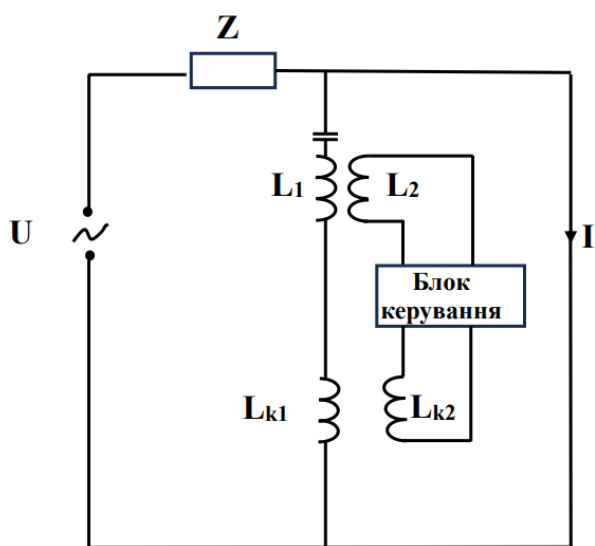


Рис. 4. Схема фільтрокомпенсуючого пристрою зі зворотними зв'язками

У практичній діяльності щодо врахування наявності вищих гармонік та інтергармонік у силовій електромережі слід врахувати, що створення синусоїдальності напруги живлення можливе й за мінімальної кількості або відсутності електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками [10]. Якщо у електромережі є гармонічні коливання напруги амплітудою ΔU й циклічною частотою $\Delta \omega$, то миттєве значення напруги визначається співвідношенням:

$$U(f) = B_H \left(\sin t + \frac{k}{2} (\cos(\omega - \Delta \omega)t - \cos(\omega + \Delta \omega)t) \right) = B(1 + k \sin \Delta t) \sin \omega t,$$

де B – середнє значення огинаючої амплітуди напруги за один період, $k = \Delta \omega / (\sqrt{2}B)$ – коефіцієнт модуляції.

За один період крива напруги відрізняється від синусоїди частотами $\omega \pm \Delta \omega$, які є інтергармоніками.

Тобто поява інтергармонік у силовій електромережі можлива у разі коливань електронавантаження у будівлі за рахунок вмикання та вимикання потужного електричного обладнання.

Процес розроблення й впровадження організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки у будівлях і спорудах загального призначення доцільно починати з ревізії системи електропостачання. Необхідно забезпечити максимально рівномірне навантаження на окремі фази трифазної силової електромережі. Визначити технічний стан існуючих систем компенсації реактивної потужності, зокрема блоків конденсаторів. Також необхідно визначити наявність електричних струмів витоку на нульові захисні провідники й заземлені металеві конструкції будівель. На наступному етапі виконується моніторинг електромагнітної обстановки з обов'язковим визначенням спектра магнітних полів наднизької частоти. Такі дані дозволяють розробити адекватні заходи електромагнітної безпеки з мінімальними витратами часу й коштів.

Висновки

1. Розглянуто ефективність основних конструкцій для одночасної компенсації реактивної потужності й придушення вищих гармонік та інтергармонік електричного струму (напруги) промислової частоти. Визначено, що в умовах складного спектра напруги у електромережі вони недостатньо ефективні. Існуючі ефективні системи мають велику вартість й доцільні для використання на підприємствах з високим енергоспоживанням для знищення втрат енергії.

2. Експериментально визначено появу у системах електроживлення гармонік, інтергармонік, у тому числі й субгармонік електричного струму промислової частоти, які генерують магнітні поля гігієнічно значущих напруженостей. Запропоновано концептуальну схему пристрою придушення гармонік та інтергармонік із застосуванням зворотних зв'язків з автоматичним реагуванням на зміни напруги у силовій електромережі.

3. Показано можливість появи у силовій електричній мережі інтергармонік напруги промислової частоти внаслідок падінь і підвищень напруги за рахунок вмикання потужного електричного обладнання. Визначено порядок розроблення організаційно-технічних заходів електромагнітної безпеки.

На попередньому етапі обов'язковою є повна ревізія системи електроживлення з вирівнюванням навантаження на окремі фази трифазної силової мережі, визначенням технічного стану систем компенсації реактивної потужності та виявлення і ліквідація електричних струмів витоку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. ДСНІП 3.3.6.096-2002. Державні санітарні норми і правила при роботі з джерелами електромагнітних полів [Чинний від 2003-03-13]: затв. наказом М-ва охорони здоров'я України від 18.12.2002 р. № 476. Київ, 2003. 16 с
2. СОУ-Н ЕЕ 20.179:2008 Розрахунок електричного і магнітного полів ліній електропередавання. Методика. Зі змінами. Київ. Науково-технічний центр електроенергетики «НЕК «Укренерго», 2016
3. IEC 61000-3-12:2011. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and ≤ 75 A per phase. International Electrotechnical Commission.
4. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. Энергоатомиздат, 2010. 375 с.
5. Глива В.А. та ін. Джерела гармонік магнітного поля у будівлях і спорудах та мінімізація їх рівнів. Проблеми охорони праці в Україні. 2015. Вип. 29. С. 48–58
6. Левченко Л. А. Перелёт Т. Н., Паньков К. В. Гармоники электрических токов промышленной частоты как источники магнитных полей и методы снижения их уровней. Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2015. Вип. 1 (23). С. 14–22.
7. Glyva V., Kasatkina N., Levchenko L., Tykhenko O., Nazarenko V., Burdeina N., Panova O., Bahrii M., Nikolaiev K., Biruk Y. Determining the dynamics of electromagnetic fields, air ionization, low-frequency sound and their normalization in premises for computer equipment. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022, 3(10-117), pp. 47–55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.258939>
8. Сасенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.В. Зниження рівнів гармонічних спотворень в електричних мережах з джерелами інтергармонік. Електрифікація транспорту. 2012. № 3. С. 78–83
9. Сасенко Ю.Л., Бараненко Т.К., Бараненко Е.В. Методы компенсации реактивной мощности в сетях с нелинейными нагрузками. Вісник приазовського державного технічного університету. 2013. Вип. 26. С. 204–210.
10. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютий А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несинусоидальность напряжения. Донецк: Норд-Пресс, 2005. — 250 с.

Received (Надійшла) 27.05.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.08.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бурдейна Наталія Борисівна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Nataliia Burdeina – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: burdeina.nb@knuba.edu.ua, ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2812-1387>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57220047954>.

Підлісний Ярослав Анатолійович – аспірант кафедри технологій захисту навколишнього середовища та охорони праці, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Yaroslav Pidlisnyi – PhD student at the Department of Environmental Protection Technologies and Labour Protection, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: Pidlisnyi97@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-3164>.

Organisational and technical means of normalising ultra-low frequency electromagnetic field levels

Nataliia Burdeina, Yaroslav Pidlisnyi

Abstract. The main approaches to normalizing the electromagnetic environment in general-purpose buildings and structures have been investigated. It has been determined that the most common resonant systems for simultaneous compensation of reactive power and suppression of higher harmonics and interharmonics of industrial frequency electric current (voltage) are ineffective in the presence of a complex spectrum of harmonics and interharmonics. It has been experimentally determined that in modern buildings and structures with a large number of electrical consumers with non-linear volt-ampere characteristics, the spectrum of interharmonics, including subharmonics, is complex and unpredictable. It has been shown that modern universal systems for suppressing harmonics and interharmonics are expensive and are suitable for use in enterprises with high electricity consumption for energy saving. A scheme for suppressing harmonics and interharmonics of industrial frequency electric current with feedback using a transformer is proposed. This approach is appropriate for unpredictable changes in the harmonic composition of the voltage in the power supply system. It is shown that interharmonics generation is also possible in buildings with a relatively small contribution of non-linear electrical consumers to the total load. Interharmonics can be generated as a result of modulation phenomena in voltage drop processes when powerful electrical consumers are switched on. The procedure for developing organizational and technical measures for electromagnetic safety based on electromagnetic monitoring is provided. It is emphasized that at the first stage of such work, it is necessary to ensure uniformity of the load on individual phases of the power grid, conduct a complete overhaul of reactive power compensation systems and eliminate leakage currents.

Keywords: electromagnetic safety, harmonics, interharmonics, electromagnetic monitoring.