

Я. І. Бірук, Я. А. Підлісний

Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ОБЛАДНАННЯ ЯК СКЛАДОВА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ БЕЗПЕКИ

Анотація. Досліджено зв'язок між станами електромагнітної сумісності електричного і електронного обладнання та електромагнітною безпекою людей. Визначено, що в результаті несиметричних та несинусоїдальних режимів силової електромережі генеруються електромагнітні поля гігієнічно значущих рівнів. Електричні струми гармонік промислової частоти генерують магнітні поля, які додаються до полів промислової частоти і погіршують електромагнітну обстановку. Показано, що навіть на великих відстанях від сторонніх джерел електричні та магнітні поля струмонесучих джерел можуть мати складну амплітудно-частотну характеристику. Амплітудні значення напруг цих частот значно перевищують нормативні. Найбільш вірогідним є те, що цей ефект обумовлений нелінійністю вольт-амперних характеристик кінцевих споживачів. Значний вплив на електромагнітну безпеку людей мають електричні струми витoku кабельними лініями і заземленими металевими конструкціями. Крім генерації магнітних полів через відсутність їх компенсації струмів протилежного напрямку, такі електричні струми є причиною електрохімічної корозії. Ліквідація цих струмів за рахунок розриву кола припиняє корозію, але без виявлення причин витoku може порушувати надійність системи електроживлення. Перевантаження нульових робочих провідників, крім аварійної ситуації, може привести до проблеми спрацювання пристроїв захисту. Електричні струми витoku і генеровані ними магнітні поля можуть давати індукційні наводки у комунікаційному обладнанні та спричиняти нештатну роботу комп'ютерної техніки. Будь-які негаранти з функціонуванням технічних приладів порушують психоемоційний стан користувачів, тому цей факт можна трактувати як непрямий (опосередкований) вплив електромагнітних полів на людей. Це особливо неприпустимо для персоналу з керування об'єктами критичної інфраструктури. Такий вплив може привести до помилок у роботі і прийняття хибних рішень. Зроблено висновок, що електромагнітна безпека і електромагнітна сумісність у широкому сенсі є двоєдиною задачею. Вирішення задач електромагнітної сумісності, крім заощадження електроенергії та збільшення термінів експлуатації обладнання, сприяє підвищенню електромагнітної і загальної безпеки людей у виробничих та побутових умовах.

Ключові слова: електромагнітна безпека, електромагнітна сумісність, гармоніки, інтергармоніки, струми витoku.

Вступ

У сучасних умовах забезпечення електромагнітної сумісності обладнання є важливим аспектом безперебійного функціонування комплексу технічних засобів на промислових підприємствах, навчальних та медичних закладах точно. У загальному випадку електромагнітна сумісність – здатність електронних пристроїв функціонувати належним чином у даному електромагнітному оточенні, не створюючи неприпустимих радіозавад іншим пристроям і водночас не піддаючись впливу небажаних електромагнітних перешкод від них.

Таким чином запобігаються збої у роботі критично важливого обладнання та гарантується стабільна робота у реальних умовах експлуатації, де існує багато джерел електромагнітних впливів. У галузі електротехніки електромагнітна сумісність забезпечується підтриманням симетричності і синусоїдальності навантажень у силовій електромережі. Але за певних умов, наприклад, за несиметричністю навантаження на окремі фази трифазної силової мережі у нульовому робочому провіднику протікають електричні струми частот гармоній промислової частоти, кратні трьом. Такі струми за певних умов генерують некомпенсовані магнітні поля гігієнічно значущих напруженостей.

Аналогічний ефект може проявлятися з боку обладнання з нелінійними вольт-амперними характеристиками навантаження. Ці магнітні поля шкідливо впливають та складно екранується через просторову розосередженість їх джерел. Порушення вимог з

електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання може спричинити непрямий, несприятливий вплив на людей.

Нестабільна робота комп'ютерної техніки погіршує психоемоційний стан користувачів, що може бути причиною помилок та прийняття хибних рішень. Особливо це стосується персоналу з керування транспортними потоками, медичних працівників тощо.

Тому доцільно дослідити зв'язки показників електромагнітної сумісності обладнання та прямим і опосередкованим впливом електромагнітних полів на людей.

Огляд літературних джерел

Електромагнітна сумісність електричного та електронного обладнання регламентується низкою міжнародних стандартів. Щодо систем електроживлення промислової частоти, це стандарти серії IEC61000, наприклад, [1].

Сумісність обладнання височастотних джерел електромагнітних полів регулюється нормативами [2, 3] та іншими.

Більшість міжнародних нормативних документів з електромагнітної сумісності набули чинності в Україні методом підтвердження [4].

Якщо нормативи з електромагнітної сумісності височастотних джерел спрямовані на підтримання стабільності роботи електронного обладнання, то усі розробки і дослідження у напрямі електромагнітної сумісності обладнання напругами наднизьких частот спрямовані на вирішення задач енергозаощадження.

Дослідження [5, 6] присвячено стійкості бездротових мереж та електронних пристроїв. Зокрема, розглянуто надійність компонентів пристроїв в умовах наявності перехресних перешкод, та параметри модуляції і кодування, взаємний вплив сумісних мереж зв'язку.

Ці питання дуже актуальні для забезпечення стабільного бездротового зв'язку, але існують не передбачувані впливи на мережі. Крім того, доцільно розглянути опосередкований вплив нештатної роботи системи зв'язку на людей.

У роботі [7] визначено засади комп'ютерного моделювання електромагнітних процесів, пов'язаних з електромагнітною сумісністю обладнання. Це дозволяє оптимізувати параметри комп'ютерних мереж, але у реальних умовах експлуатації існують зовнішні впливи на системи, які неможливо передбачати і закласти у відповідні моделі.

Дослідження [8] стосується проблематики електромагнітної сумісності систем автоматизації управління будинками. Втім, єдиним засобом підвищення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання пропонується екранування комунікаційних кабелів. Але висновок щодо захищеності кабелів металевими екранами за рахунок відбиття низькочастотних електромагнітних хвиль не є коректним. Низькочастотні поля у суцільних екранах індують струми провідності, що може тільки погіршити ситуацію, якщо не внести додаткових заходів, наприклад, одночасне заземлення екрана великої довжини.

Проблематика електромагнітної сумісності мереж електроживлення розглянута у [9]. Зокрема, проаналізовано засоби зниження несиметричності і несинусоїдальності напруги, але ця робота стосується споживачів з великими електроспоживаннями й акцентується на зниженні втрат енергії.

У роботі [10] розглянуто узагальнені показники якості енергії, зокрема з одночасним врахуванням усіх критичних факторів. Дана робота стосується загальних мереж електропередачі, не розглядає можливих відхилень якості енергії у окремих об'єктах.

В останні роки дуже вагомим фактором впливу на стан електромагнітної сумісності низькочастотних мереж є джерела відновлювальної енергії [11]. Коливання реактивної потужності та використання інверторів на сонячних і вітрових електростанціях призводить до погіршення якості електрогенерації та ускладнює застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв. Дослідження спрямоване на зниження втрат електроенергії, не розглядаючи можливість впливів магнітних полів електрострумів гармонік та інтергармонік промислової частоти на людей.

Мета роботи – визначення зв'язку між забезпеченням електромагнітної сумісності і електричного та електронного обладнання й забезпеченням електромагнітної безпеки людей з визначенням заходів її підвищення.

Викладення основного матеріалу

Уся електронна апаратура проходить тестування на предмет відповідності вимогам щодо електромагнітної сумісності.

Наприклад, в країнах Євросоюзу це випробування «EU-Tyre examination», які визначають відповідність обладнання вимогам Директиви 2014/30/EU (Додаток 1). Згідно вимогам Директиви, апаратура повинна виготовлятися з урахуванням останніх науково-технічних досягнень для забезпечення стабільної роботи – не створювати ненормативних радіозвад і мати відповідну стійкість до них.

Емісійні властивості засобів обчислювальної техніки регламентуються поширеними міжнародними стандартами TCO та MPRII. Описана у них процедура тестування і граничні рівні електромагнітних полів практично виключають збої у роботі техніки та негативний вплив на користувачів. Але випробування зразків технічних засобів виконуються у лабораторних умовах із унеможливленням стороннього впливу на тестоване обладнання. У реальних умовах експлуатації за підключення обладнання до силової та інформаційної мережі показники можуть змінюватися. Дослідження свідчать, що у деяких випадках електричне поле навколо сучасного відеомонітора сягає 2000–2500 нТл, а гранично допустимий рівень – 250 нТл. При цьому немає сумнівів у відповідності обладнання чинним вимогам з електромагнітної сумісності.

Причиною підвищення рівнів електромагнітних полів, в основному, є незадовільна якість електроенергії та сторонні магнітні поля наднизької частоти, при цьому останнє обумовлене або хибями у монтажі системи електроживлення, або електричними струмами витоку. Якість електроенергії для кінцевого споживача визначається симетричністю та синусоїдальністю напруги. Обидва ці параметри нормуються. Відмінності навантаження на окремі фази трифазної силової мережі не повинні перевищувати у розподільних щитах 30 %. Коефіцієнт симетричності напруги за нульовою послідовністю – не більше 4 %, за зворотною послідовністю – 2 %.

З точки зору електромагнітної безпеки, несприятливий вплив на людей мають магнітні поля, генеровані некомпенсованими електричними струмами у нульових робочих провідниках.

Аналогічний ефект може виникати через навантаження споживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками. Це може бути причиною генерації електричних полів зі складними амплітудно-частотними характеристиками (рис. 1).

Як видно з рис. 1, структура електричного поля має чітко виражені гармоніки промислової частоти. Вимірювання здійснювалися на великій відстані від сторонніх джерел, тобто цей склад поля обумовлений виключно гармонічним складом напруги у провіднику.

Склад й амплітуди гармонік відносно промислової частоти нормується (табл. 1).

Різні значення вищих гармонік обумовлені різними чинниками їх генерації, тому у енергетиці вони розділені на три групи. Але з точки зору електромагнітної безпеки критичними є їх наявність і амплітуди. У загальному випадку коефіцієнти спотворення для силової мережі напругою 380 В складають 8 % у нормальному режимі і 12 % у максимально допустимій.

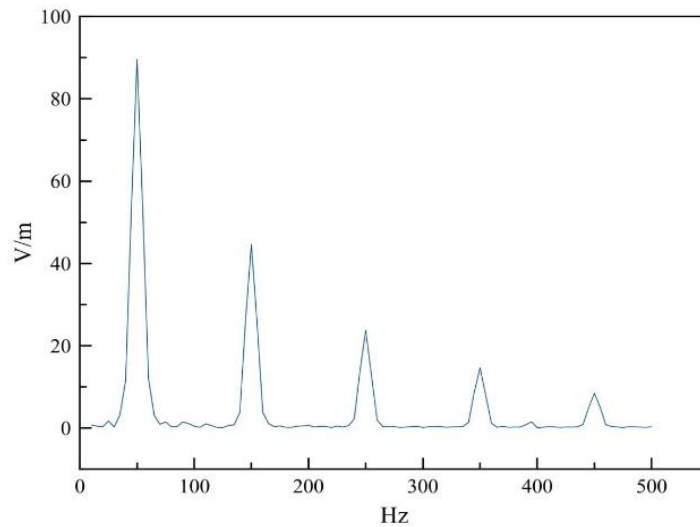


Рис. 1. Електричне поле лінійного струмонесучого провідника за відсутності зовнішнього впливу на амплітудно-частотні характеристики

Таблиця 1 – Допустимі значення коефіцієнта гармонік для нормального режиму електромережі напругою 380 В

Номер гармоніки	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Амплітуда, %	2	2,5	1	6	0,5	5	0,5	0,75	0,5	3,5	0,2

Дані рис. 1 свідчать, що амплітудні значення гармонік промислової частоти можуть значно перевищувати гранично допустимі значення. Крім значних втрат енергії та зниження ресурсу електротехнічного обладнання, електричні та магнітні поля гармонік підвищують несприятливий вплив на людей.

Найвпевненіше у силовій електромережі інтергармонік викликає спотворення напруги живлення. Внаслідок цього можливі низькочастотні коливання у рухомих пристроях (двигунах), що підвищує акустичний вплив на людей.

Порушується робота люмінесцентних систем освітлення і електронного обладнання, ймовірно перешкоди для телекомунікаційного обладнання, що є непрямым шкідливим впливом на людей.

Ще одним несприятливим чинником впливу на людей у разі порушення електромагнітної сумісності обладнання є флікери (коливання напруги різної періодичності). Це явище несприятливо впливає на зорову функцію. Провали напруги через спрацювання автоматики захисту негативно впливають на автоматизовані системи моніторингу та управління у сучасних виробничих та житлових комплексах. У таких умовах зростає значення коректної роботи фільтрокомпенсаційних пристроїв.

Слід враховувати, що в Україні системи компенсації реактивної потужності здебільшого мають великі терміни експлуатації та не виконують свої функції у умовах погіршення якості електроенергії. Розрахунки щодо ефективності зменшення не синусоїдальності напруги (параметри компенсуючого пристрою та фільтру) наведено в [9], але вони мають оціночний характер.

Це пояснюється тим, що у реальних умовах необхідно враховувати значення активних опорів навантаження.

Ще одним чинником несприятливого впливу на людей є магнітні поля електрострумів витоку. Порушення електромагнітної сумісності є причиною виникнення струмів витоку у нульових робочих провідниках силової електромережі. Значною мірою це обумовлене застосуванням у багатьох будівлях застарілих систем організації заземлення TN-C. Якщо з якихось причин нульовий робочий дріт має гальванічний зв'язок з нульовим захисним провідником або металеву конструкцією будівлі, частинка електроструму протікає РЕ-системою. При цьому виникає дисбаланс струмів і генерує у оточуючому просторі магнітне поле. Додаткове магнітне поле генерується електричними струмами, які протікають заземленими металевими конструкціями. Такі поля впливають прямо та опосередковано на людей (рис. 2).

Прямий вплив полягає у безпосередній дії полів на людей, а опосередкований – у порушенні штатної роботи комунікаційних ліній електронного обладнання, що впливає на психоемоційний стан людей. У користувачів засобів обчислювальної техніки це може бути причиною помилок у роботі, що особливо неприпустимо для персоналу з управління об'єктами критичної інфраструктури. На сьогодні ліквідація струмів витоку здійснюється в основному для ліквідації електрохімічної корозії. Найефективнішим методом є застосування діелектричних вставок для розриву електронного кола або заміна металевих комунікацій на полімерні. При цьому ліквідується причина електрохімічної корозії, але не усувається першопричина наявності струмів витоку.

Тому при цьому може суттєво зрости навантаження на нульові робочі провідники і підвищитися опір кола «фаза-нуль», що призводить до зниження струму короткого замикання. Тому можуть не спрацювати пристрої захисту від короткого замикання.



Рис. 2. Прямий та опосередкований вплив електромагнітних полів на людей

Для штатного функціонування систем електроживлення будівель в умовах нестабільності електропостачання та наявності великої кількості електроспоживачів з нелінійними вольт-амперними характеристиками доцільно виконати комплекс робіт з виявлення та усунення електричних струмів витоку.

Необхідно провести повний комплекс перевірок електроустановок будівель. Особливо увагу слід приділити технічному стану обладнання компенсації реактивної потужності. Обов'язковою є ревізія нульових захисних провідників, – перевірка правильності монтажу, перерізів тощо. Також обов'язковим є встановлення сучасних пристроїв захисного відключення електроживлення.

Наведене свідчить, що забезпечення електромагнітної сумісності електричного і електронного обладнання та електромагнітної безпеки людей є двоєдиною задачею. Їх вирішення окремо призводить до певних суперечностей, виходячи з різних цілей, та збільшує час та обсяги робіт. Комплексний підхід до реалізації розглянутих задач зменшує обсяги витрат та дозволить оптимізувати параметри силового електроживлення будівель і споруд різного призначення.

Висновки

1. Показано, що за несиметричного навантаження та нелінійних вольт-амперних характеристик обладнання у будівлях можуть генеруватися магнітні поля частот гармонік промислової частоти з напруженостями гігієнічно значущих рівнів. Такі поля за рахунок індукційних наводок спричиняють збої у роботі електронного обладнання, зокрема комп'ютерної техніки. Рівні гармонік перевищують нормативні значення навіть за межами будівель, що може бути наслідком нелінійності навантаження кінцевих споживачів.

2. Наявність у силовій мережі інтергармонік, провалів напруги та її пульсації (флікера) негативно впливає на людей через малопомітні пульсації штучного освітлення та спричиняє додатковий шум рухомих електричних пристроїв. Наявність електричних струмів витоку на нульові робочі провідники силової мережі та металеві заземлені конструкції підвищує електромагнітний фон у приміщеннях. Фізичне припинення протікання струмів витоку без ліквідації причин витоків може негативно впливати на надійність систем електроживлення.

3. Зовнішні електромагнітні поля і поля технічних засобів мають прямий вплив на людей, але вони можуть впливати на стабільність роботи технічних засобів, наприклад, комп'ютерної техніки, порушуючи психоемоційний стан користувачів. Це може вважати непрямим (опосередкованим) несприятливим впливом на людей. Такий вплив обумовлений порушеннями електромагнітної сумісності технічних засобів. Таким чином, задачі забезпечення електромагнітної сумісності і електромагнітної безпеки можна вважати двоєдиною задачею.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 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. URL: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/16966/85cef6616b0f4d06b7a86cfe3e60e808/IEC-61000-3-12-2011.pdf>
- ETSI EN 300 220-2 V2.4.1 (2012-01). Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Short Range Devices (SRD); Radio equipment to be used in the 25 MHz to 1 000 MHz frequency range with power levels ranging up to 500 mW; Part 2: Harmonized EN covering essential requirements under article 3.2 of the R&TTE Directive. European Telecommunications Standards Institute. 2012. 20 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300200_300299/30022002/02.04.01_60/en_30022002v020401p.pdf

3. ETSI EN 301 489-1 V2.2.1 (2019-03). ElectroMagnetic Compatibility (EMC) standard for radio equipment and services; Part 1: Common technical requirements; Harmonised Standard for ElectroMagnetic Compatibility. Directive. European Telecommunications Standards Institute, 2019. 36 p. URL: https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301400_301499/30148901/02_02_01_20/en_30148901v020201a.pdf
4. Про затвердження Технічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання. [Чинний від 2018-11-17]: затв. Постановою Кабінету Міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1077. Київ, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1077-2015-%D0%BF>
5. Лазебний, В. С., & Омелянець, О. О. (2024). Electromagnetic compatibility of wireless networks IEEE 802.11AC. Technologies and Engineering, (1), 67–76. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.1.7>
6. Леонов, С., & Borovik, O. (2020). Дослідження роботи електронних пристроїв з урахуванням електромагнітної сумісності. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 4(6), 71–76. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2020.04.11>
7. Пантелєв, М., & Мясоєдов, П. (2025). Електромагнітна сумісність технічних об'єктів і систем: попередній огляд деяких програмних засобів для комп'ютерного моделювання. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (13)), 21–25. <https://doi.org/10.20998/2079-3944.2025.1.05>
8. Кубай В.С., Зінковський Ю.Ф. Електромагнітна сумісність системи автоматизації і управління будинками KNX. Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи»: матеріали конференції, 16-22 листопада 2020 р., м. Київ, Україна / КПІ ім. Ігоря Сікорського, РТФ. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – С. 42-45. URL: <https://ela.kpi.ua/items/e5f5a0fc-f3b2-457d-a0aa-f5c39dc643a2>
9. Kuznetsov, V. G., Tugay, Y. I., Kuchanskiy, V. V., Lyhovydy, Y. G., & Melnichuk, V. A. (2018). THE RESONANT OVERVOLTAGE IN NON-SINUSOIDAL MODE OF MAIN ELECTRIC NETWORK. Electrical Engineering & Electromechanics, (2), 69–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.12>
10. В.Г. Кузнецов. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. Електроенергетичні системи та устаткування, 2011, №3, стор. 46-52. URL: <https://nasplib.isofts.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/51e165b0-9049-4a3f-9a74-59721817a12a/content>
11. Папаїка, Я., Лышенко, О., Бубликов, А., & Олишевський, І. (2021). Problems of electromagnetic compatibility of powerful energy associations during mass connection of renewable energy sources. Electrical Engineering and Power Engineering, (1), 34–45. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-4>

Received (Надійшла) 31.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Бірук Яна Ігорівна – доктор філософії, доцент, доцент кафедри фізики, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна;

Yana Biruk – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics, Kyiv National University of Construction and Architecture, Kyiv, Ukraine;

e-mail: yesna0999@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3669-9744>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57225188391>.

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 ID: <https://orcid.org/0009-0008-4906-3164>

Electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment as a component of electromagnetic safety

Yana Biruk, Yaroslav Pidlisnyi

Abstract. The relationship between the electromagnetic compatibility of electrical and electronic equipment and the electromagnetic safety of people has been investigated. It has been determined that asymmetrical and non-sinusoidal modes of the power grid generate electromagnetic fields of hygienically significant levels. Industrial frequency harmonic electric currents generate magnetic fields that add to industrial frequency fields and worsen the electromagnetic environment. It has been shown that even at large distances from external sources, the electric and magnetic fields of current-carrying sources can have complex amplitude-frequency characteristics. The amplitude values of the voltages of these frequencies significantly exceed the normative ones. The most likely explanation for this effect is the non-linearity of the volt-ampere characteristics of end consumers. Electric leakage currents through cable lines and grounded metal structures have a significant impact on the electromagnetic safety of people. In addition to generating magnetic fields due to the absence of compensation currents in the opposite direction, such electric currents cause electrochemical corrosion. Eliminating these currents by breaking the circuit stops corrosion, but without identifying the causes of leakage, it can compromise the reliability of the power supply system. Overloading of zero working conductors, except in an emergency, can lead to problems with the operation of protective devices. Leakage electric currents and the magnetic fields they generate can cause induction interference in communication equipment and cause computer equipment to malfunction. Any malfunction of technical devices affects the psycho-emotional state of users, so this fact can be interpreted as an indirect (mediated) effect of electromagnetic fields on people. This is especially unacceptable for personnel managing critical infrastructure facilities. Such an impact can lead to errors in work and wrong decisions. It has been concluded that electromagnetic safety and electromagnetic compatibility in a broad sense are two sides of the same coin. Solving electromagnetic compatibility issues, in addition to saving electricity and increasing the service life of equipment, contributes to improving electromagnetic and general safety for people in industrial and domestic environments.

Keywords: electromagnetic safety, electromagnetic compatibility, harmonics, interharmonics, leakage currents.