

Б. В. Болібрux¹, О. О. Козлітін², Д. Б. Осадчий³

¹Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Національний авіаційний університет, Київ, Україна

³Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

АКУСТИЧНИЙ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВПЛИВ КОРОННИХ РОЗРЯДІВ НА СТАН ВИРОБНИЧОГО СЕРЕДОВИЩА

Анотація. На основі аналізу досліджень щодо інтенсивності коронних розрядів показано, що електромагнітні випромінювання та акустичний шум, генеровані коронними розрядами, можуть мати прямий та опосередкований негативний вплив на працюючих. Зокрема, опосередкований вплив полягає у впливі нестабільності функціонування технічних засобів на емоційно-психологічний стан людей. Визначено частотні спектри електромагнітних випромінювань коронних розрядів. Показано найбільш прийнятний метод визначення інтенсивності коронних розрядів у залежності від напруженості електричного поля біля поверхні землі. Показані найбільш прийнятні співвідношення між рівнями корисного радіосигналу та рівнями радіозавад. Надано співвідношення щодо згасання рівнів радіозавад з відстанню від джерела випромінювання. Надано частотну залежність інтенсивності радіозавад, що може бути використано при виконанні проєктних робіт. Представлено кількісні значення емісії найбільш поширених бездротових систем та технічних засобів, а також їх стійкості до радіозавад (ноутбуки, сервери, мобільні телефони тощо). Показано, що радіозавади можуть бути причиною не тільки несприятливого впливу на людей, а й спричинити нестабільну роботу обладнання об'єктів критичної інфраструктури через непередбачувані сплески височастотних випромінювань до 1,5–3,5 мВт/см². Визначено, що найбільш суттєвим акустичним впливом ліній електропередачі є звукова частота 100 Гц, та кратні їй. Крім того коронні розряди генерують широкосмуговий шум. Надано розрахунки рівнів шуму. Показано, що емпіричні співвідношення розрахунків рівнів шуму дещо неоднозначні, тому у практичній діяльності, особливо у процесі виконання проєктних робіт, доцільно порівнювати результати з натурними вимірюваннями на діючих об'єктах. Підвищення інтенсивності шуму зі збільшенням кількості дротів у фазі разом зі зниженням напруженості електричних полів біля поверхні дротів відкриває можливість оптимізації конструктивних рішень з точки зору мінімізації несприятливого впливу ліній електропередачі на людей і довкілля в цілому.

Ключові слова: коронний розряд, радіозавади, акустичний шум, електромагнітна сумісність.

Вступ

В умовах сучасного виробництва параметри середовища за усіма фізичними чинниками формуються за рахунок багатьох впливів. Це обумовлено як різноманітністю технологічного обладнання, так і зовнішніми факторами. Одним з таких факторів є коронні розряди, що виникають за високих напруг та нештатних явищ у роботі електротехнічного обладнання.

Більшість досліджень щодо зменшення коронування спрямовані на мінімізацію енергетичних втрат. Але електромагнітні поля середніх та дуже високих частот, які генеруються коронними розрядами, можуть несприятливо впливати на людей та створювати завади технічним засобам, наприклад комп'ютерній техніці, що є опосередкованим негативним впливом на працюючих. Крім того, коронні розряди супроводжуються певним шумом, який створює дискомфортні умови для персоналу.

Ці питання на сьогодні залишаються майже поза увагою через невисокі рівні електромагнітних полів та шуму, але у комплексі з іншими фізичними впливами можуть суттєво впливати на якість виробничого середовища.

Дані питання потребують з'ясування та визначення засобів оцінювання рівнів і шляхів зниження впливу коронування на стан середовища.

Огляд літературних джерел та постановка задач дослідження

Основними міжнародними нормативними актами, які обмежують інтенсивності коронних розрядів є документи, що регламентують емісію та несприйнятливості електричного та електронного обладнання щодо електромагнітних впливів, наприклад [1, 2].

В Україні інтенсивність коронування регламентується відомчим нормативом [3]. Він спрямований на зниження втрат електроенергії внаслідок коронних розрядів.

Це обумовлює виконання досліджень щодо розроблення і впровадження заходів і засобів зі зниження втрат електроенергії на корону.

У роботі [4] запропоновано спосіб діагностування ліній електропередачі за акустичним спектром коронного розряду.

Дослідження [5] стосується також виявлення коронування у автоматичному режимі. Ці дослідження дозволяють своєчасно виявити нештатні явища та ліквідувати їх.

Серія досліджень у підсумку сприяла науковому обґрунтуванню визначення впливу коронних розрядів на якість електроенергії [6]. Але такі дослідження не стосуються прямого та опосередкованого впливу коронних розрядів на людей.

У роботі [7] показано, що своєчасне проведення регламентних робіт на енергетичних об'єктах мінімізує виникнення корони.

Це ж стосується роботи [8], де показано, що нагальною потребою для зниження електромагнітних впливів на людей є забезпечення оптимізації розміщення обладнання.

На сьогодні встановлено, що шум малої інтенсивності, навіть низькочастотний, негативно впливає на людей [9].

Внаслідок коронних розрядів відбувається іонізація повітря, але при цьому неконтрольовано генерується озон та оксиди азоту, що шкідливо для людей. Внаслідок деіонізації атмосферного повітря через експлуатацію технічних засобів [10] у приміщеннях широко використовують пристрої штучної іонізації повітря.

Але більшість з них працює за принципом коронного розряду, що негативно впливає на людей [11].

На сьогодні не розроблено системного підходу щодо визначення ступеню впливу коронних розрядів на людей у виробничих умовах із урахуванням необхідності забезпечення електромагнітної сумісності технічних засобів

Мета роботи – визначення інтенсивності просторових поширень електромагнітних полів та шуму коронних розрядів та визначення умов мінімізації їх впливу на людей у виробничих умовах.

Викладення основного матеріалу

Найбільшу інтенсивність коронний розряд має на лініях електропередачі. Він створює завади роботі усій електронній апаратурі, яка використовує бездротовий зв'язок, а також акустичний шум. Найбільша інтенсивність радіозавад та шуму обумовлена стримерними розрядами на дротах.

Стримерна корона виникає за будь-яких умов у залежності від напруги та неоднорідності електричного поля, але найбільш сприятливі умови є за наявності опадів. Найсильніші радіозавади і шум виникають на високовольтних лініях під час дощу. Але за сухої погоди коронні розряди виникають у місцях пошкодження ізоляторів, гірлянд, забруднені дротів тощо.

Корона притаманна гірляндам з ушкоджених або забруднених керамічних ізоляторів.

Спектр частот електромагнітного випромінювання має діапазон від 10 кГц до 1 ГГц, але завади з частотами, вищими за 30 МГц виникають за коронування ліній напругами від 220 кВ.

Інтенсивність радіозавад характеризується вертикальною складовою напруженості електричного поля поблизу поверхні землі. Вона визначається співвідношенням:

$$I = 10 \lg \left(\frac{E_2}{E_1} \right)^2 = 2 \lg \frac{E_2}{E_1},$$

де E_2 – напруженість електричного поля біля поверхні землі; E_1 – базове значення. E_1 зазвичай приймають за 1 мкВ/м.

Тобто, у розрахунках можна вважати:

$$I = 20 \lg E_2.$$

Згідно з рекомендацією Міжнародного комітету з радіозавад за розрахункову частоту береться частота 0,5 МГц.

Рівень корисного сигналу на цій частоті складає приблизно 60 дБ. Робота радіоапаратури вважається стабільною, якщо корисний сигнал перевищує завади на 20 дБ.

Тому за сприятливих погодних умов прийнятний рівень радіозавад складає 40 дБ. Це значення відповідає напруженості електричного поля біля поверхні землі 100 мкВ/м. Згідно чинних нормативів, така напруженість електричного поля радіозавад є допустимою на відстані 100 м від проєкції кратного фазного дроту лінії електропередачі напругою 330 кВ на землі.

Натурні вимірювання свідчать, що наведена межа досягається навіть на лініях меншої напруги, що обумовлено технічним станом арматури.

Рівні радіозавад знижуються з відстанню, що цілком природно.

$$\Delta I = 20k \lg \frac{l_1}{l_2},$$

де l_1, l_2 – відстані від джерела випромінювання; k – коефіцієнт згасання. Для частот 0,15–1,00 МГц від складає 1,6.

Залежність між рівнями радіозавад і напруженості електричного поля на поверхнях дротів лінійна і відповідає емпіричному співвідношенню:

$$I_2 - I_1 = K_1(E_2 - E_1),$$

де E_2, E_1 – напруженості електричного поля на поверхнях дротів; I_2, I_1 – відповідні рівні радіозавад; K_1 – коефіцієнт пропорційності. Для напруженостей полів 20–30 кВ/см $K_1 = 1,8$.

Слід зазначити, що в усіх розрахунках напруженість електричного поля визначається у кВ/см. Це відповідає розрахунковому апарату, затвердженому відповідними національними нормативами.

Слід зазначити, що рівні радіозавад знижуються зі зростанням частоти електромагнітного випромінювання. У діапазоні частот 0,15–5,00 МГц рівень радіозавад по відношенню до їх рівня на частоті 0,5 МГц визначається як:

$$I_f = 5,5 \left[1 - 2(\lg 10f)^2 \right],$$

де f – частота, МГц.

Це дає змогу оцінити радіозавади, які генерує тиме лінія електропередачі, що проєктується. Для цього необхідно мати надійні дані щодо лінії, яка перебуває у експлуатації.

$$I_2 = I_1 + 1,8(E_2 - E_1) + 40 \lg \frac{K_2}{K_1}.$$

На сьогодні проблемою є наявність коронних розрядів усередині приміщень, що притаманне

об'єктам енергетики і частково іншим приміщенням, наприклад, у яких використовується високовольтна апаратура.

Прикладом можуть бути високовольтні іонізатори повітря, які є різновидами люстри Чижевського.

При визначенні рівнів електромагнітної сумісності сучасної електронної техніки слід враховувати її емісійні властивості обладнання та його сприйнятливості щодо електромагнітних завад (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Рівні випромінювання щодо електромагнітної сумісності апаратури

Notebook	-36 дБм
Wi-Fi роутер	-30 дБм
Сервер	-40 дБм
Мобільний телефон	-25 дБм
DTU - T2 приймач	-26 дБм

Таблиця 2 – Чутливість обладнання

Бездотовий мікрофон	-110 дБм
Bluetooth	-90 дБм
Wi-Fi 802-11	-90 дБм
FM - приймач	-110 дБм
DTU - T2 приймач	-80 дБм

Не дивлячись на малі значення щодо емісії так і достатню стійкість апаратури, необхідно враховувати значні коливання випромінювань радіозавади.

Наприклад, у процесі вимірювань щільностей потоків енергії у багатьох виробничих приміщеннях – диспетчерських аеропортів, машинних залах генераторів електроенергії, лабораторіях електричних машин системним явищем були раптові сплески високочастотних випромінювань рівнів 1500–3500 мкВт/см². Це потрібно враховувати у практичній діяльності.

Відомо, що акустичний шум генерується коронними розрядами здебільшого за наявності високої вологості повітря, але за ушкоджень апаратури суттєвий шум виникає і за сухої й сонячної погоди. Експериментально встановлено, що шипіння від корони відповідає частоті звуку 100 Гц та кратним її частотам. Також генерується широкополосний шум.

Частота 100 Гц не випадкова. Вона обумовлена рухом об'ємного заряду у дротах двічі за період, що відповідає промисловій частоті напруги 50 Гц. При цьому створюються хвилі звукового тиску.

Широкополосний шум генерується стримерною короною.

Вимірювання таких шумів здійснюється і нормується за шкалою корекції «А» з урахуванням чутливості слуху людини.

Найбільш суттєві рівні звуку під час дощу і туману. Рівні гучності перевищують звичайний звуковий фон на 5–6 дБА.

Для визначення гучності можна використовувати емпіричне співвідношення:

$$L = 16 + 1,14E + 9r + 15 \lg n - 10 \lg l,$$

де L – рівень гучності, дБА; r – радіус дротів, см; E – максимальна напруженість електричного поля поверхні дротів, кВ/см; n – кількість дротів у розщепленій фазі; l – відстань від крайнього фазного дроту до місця визначення гучності, м.

Слід зауважити, що існують розбіжності щодо визначення гучності ліній електропередачі.

Наприклад, застосовується таке співвідношення:

$$L = 20 + 0,0111E + 900r + 15 \lg n - 20 \lg l,$$

де L – рівень звуку, дБА; r – радіуси дротів, м; E – діюче значення максимальної напруженості електричного поля на поверхні дротів, кВ/м; n – кількість дротів у розщепленій фазі; l – відстань від крайнього фазного дроту, м.

При цьому напруженість електричного поля на поверхні дротів визначається зі співвідношення:

$$E = \frac{CU}{2\sqrt{3}\pi\epsilon_0 r},$$

U – діюча напруга, В; C – ємність одного дроту, Ф; ϵ_0 – електрична стала, (8,85*10⁻¹² Ф/м); r – радіуси дротів, м.

У свою чергу ємність дроту розраховується як:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon}{\ln(d/r)}.$$

де ϵ – відносна діелектрична проникність повітря, d – середньгеометрична відстань між дротами, м.

Як видно з наведених співвідношень, інтенсивність шуму зростає при збільшенні кількості дротів у фазі, що забезпечує зниження допустимої напруженості електричного поля на поверхні дротів. Тобто, у процесі виконання проектних робіт та оцінювання генерації шуму можлива раціоналізація параметрів із забезпечення прийнятних значень щодо виникнення коронних розрядів та генерації електромагнітних та акустичних дротів.

Висновки

1. Показано, що коронні розряди є суттєвим джерелом радіозавад, які спричиняють проблеми щодо електромагнітної сумісності електронної апаратури та негативно впливають на працюючих (прямо та опосередковано). Коронні розряди генерують акустичний шум гігієнічно значущих рівнів, що у поєднанні з іншими техногенними факторами складає суттєвий несприятливий комбінований вплив на людей.

2. Надано частотний спектр та співвідношення щодо визначення інтенсивності коронних розрядів від ліній електропередачі. Це дозволяє визначити зони безпечного перебування персоналу у відповідності з діючими санітарно-гігієнічними нормами.

3. Визначенні значення емісії та стійкості найбільш поширеної електронної апаратури, яка використовує бездротові способи передачі інформації, що дозволяє забезпечувати її стабільну роботу за

рахунок її взаємного розташування та розміщення у зонах мінімального зовнішнього впливу.

4. Надано засади визначення рівнів акустичного шуму коронних розрядів, що доцільно для вико-

ристання у процесі виконання проєктних робіт. Необхідною умовою є порівняння розрахунків з даними щодо ліній електропередачі, які перебувають у експлуатації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 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_40/en_30022002v020401o.pdf (дата звернення: 17.05.2023).
2. 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: http://uas.org.ua/wp-content/uploads/2019/04/en_30148901v020201a.pdf (дата звернення: 17.05.2023).
3. СОУ НЕК 29.240.1-13:2019 (EN 50341-1:2012, IDT) Повітряні лінії електропередавання напругою понад 1 кВ змінного струму. Частина 1. Загальні технічні характеристики. (Наказ від 07.05.2019 № 262).
4. Карпалюк І.Т., Гриб О.Г., Швець С.В. Рудевич Н.В., Захаренко Н.С. коронного розряду на струмопровідних частинах електричної системи за акустичними коливаннями. Науково-технічний збірник гірничо електромеханіка та автоматика Національного ТУ «Дніпровська політехніка»: Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2019. №102. С. 3–7
5. M. Rezinkina, O. Rezinkin, I. Karpaliuk and V. Grabko, "Control and Monitoring of Power Transmission Lines Condition over Wide Area with the Help of UAVs," 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2020, pp. 172-175, doi: 10.1109/ESS50319.2020.9160150.
6. Карпалюк І. Т. Методи та засоби оцінки впливу коронного розряду на якість електропостачання: дис. д-ра техн. наук спец. 05.09.03: Харків, 2020. – 333 с.
7. Паньків Х.В. Нормалізація фізичних факторів виробничого середовища енергетичних об'єктів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 Київ, 2016. 22 с.
8. Глива В.А., Ходаковський О.В., Тихенко О.М., Панова О.В. Засоби керування електромагнітною обстановкою в умовах її часових та просторових змін. Управління розвитком складних систем. 2019. Вип. 39. С. 199–205.
9. Sihar I. Numerical modelling of transient low-frequency sound propagation and vibration in buildings. Eindhoven: Eindhoven University of Technology. 2022. 213 p.
10. Bolibruxh, B., Glyva, V., Kasatkina, N., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Bogatov, O., Petrunok, T., Aznaurian, I., & Zozulya, S. (2022). Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1(10(115)), 24–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>.
11. Електростатичний повітряний фільтр-іонізатор: пат. 87189 Україна, МПК: В03С 3/08. № 2013100086; заявл. 14.08.2013; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2. 4 с.

Received (Надійшла) 02.10.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 29.11.2023

Acoustic and electromagnetic influence of corona discharges on the condition of the production environment

B. Bolibruxh, O. Kozlitin, B. Osadchiy

Abstract. Based on the analysis of studies on the intensity of corona discharges, it is shown that electromagnetic radiation and acoustic noise generated by corona discharges can have a direct and indirect negative impact on workers. In particular, the indirect influence consists in the influence of the instability of the functioning of technical means on the emotional and psychological state of people. Frequency spectra of electromagnetic radiation of corona discharges were determined. The most acceptable method of determining the intensity of corona discharges depending on the intensity of the electric field near the earth's surface is shown. The most acceptable ratios between the levels of the useful radio signal and the levels of radio interference are shown. The ratio of the attenuation of radio interference levels with the distance from the radiation source is given. The frequency dependence of the intensity of radio interference is given, which can be used when performing project works. Quantitative emission values of the most common wireless systems and technical devices, as well as their resistance to radio interference (laptops, servers, mobile phones, etc.) are presented. It is shown that radio interference can cause not only an adverse effect on people, but also cause unstable operation of equipment of critical infrastructure facilities due to unpredictable bursts of high-frequency radiation up to 1.5–3.5 mW/cm². It was determined that the most significant acoustic impact of power transmission lines is a sound frequency of 100 Hz and its multiples. In addition, corona discharges generate broadband noise. Calculations of noise levels are provided. It is shown that the empirical ratios of noise level calculations are somewhat ambiguous, therefore, in practical activities, especially in the process of project works, it is advisable to compare the results with field measurements at existing facilities. An increase in noise intensity with an increase in the number of wires in a phase together with a decrease in the intensity of electric fields near the surface of the wires opens up the possibility of optimizing design solutions from the point of view of minimizing the adverse impact of power transmission lines on people and the environment as a whole.

Keywords: corona discharge, radio interference, acoustic noise, electromagnetic compatibility.