

**О. І. ДОРОШЕНКО**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ОПУ», Одеса

## **ПРО ФІЗИКУ ВЛАСНОЇ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ**

Зважаючи на те, що робочим органом електроенергетичної системи є її електромагнітне поле, яке може існувати лише у її діелектричному середовищі, що оточує струмоведучі частини системи і складається з електромагнітних полів усіх її електроустановок, пропонується у поняття електромагнітної сумісності таких систем вкладати їх спроможність до нормального функціонування за умови нормального навантаження усіх їх електроустановок з визначенням рівня допустимості та необхідності такої сумісності.

**Ключові слова:** електроенергетична система, електромагнітне поле, електромагнітна сумісність, умови достатності і необхідності електромагнітної сумісності

**Вступ.** Як відомо, електроенергетика є основою життя людського загалу у всіх сферах його діяльності. Її призначення – безпечне, економне та безперебійне постачання споживачам електричної енергії (ЕЕ). Цю функцію вона здійснює за допомогою своїх виробничо-технічних підрозділів – електроенергетичних систем (ЕЕС). У відповідності до визначення в [1], це сукупність електроустановок у якій переробляються енергоресурси з метою одержання, передачі, розподілу та споживання (перетворення у інші види) ЕЕ. З цього приводу в [2] повідомляється наступне: «...Электромагнитная энергия от места ее генерирования передается к месту потребления по диэлектрику (провода же в линиях передачи выполняют двойную роль: они являются каналами, по которым проходит ток, и организаторами структуры поля в диэлектрике)...»

Таким чином, фізично, ЕЕ є енергією загального електромагнітного поля кожної ЕЕС і її підсистем – систем електропостачання (СЕП) [3]. Оскільки така ЕЕС і СЕП є сукупністю окремих електроустановок, які, у свою чергу, складаються з окремих електротехнічних пристроїв, то нормальна робота такої системи можлива лише у тому випадку, коли електромагнітні поля окремих пристроїв не спотворюють електромагнітні поля інших пристроїв і загального поля системи. Тобто, усі елементи ЕЕС нормально співпрацюють разом у такому полі і така спроможність ЕЕС до нормального виконання згаданих вище функцій називається її власною (технологічною) електромагнітною сумісністю. Автори роботи [4] вважають електромагнітну сумісність глобальною проблемою і наводять таке її визначення: «...Электромагнитная сумісність технічних засобів розглядає пристрої та процеси, описувані в традиційних електротехнічних курсах, з погляду генерування електромагнітних перешкод, їхнього впливу на електроустаткування, ступінь автоматизації та

корекції негативного впливу... «.

На нашу думку, у першу чергу, необхідно розглядати проблему власної електромагнітної сумісності кожної ЕЕС і її підсистем (СЕР) з урахуванням їх взаємного впливу на екологію (ЕКО-ЕМС), біосферу (БІО-ЕМС), техносферу (ТЕХНО-ЕМС) та інформаційну (електроно-ЕМС) сферу, у відповідності до рис. 1.

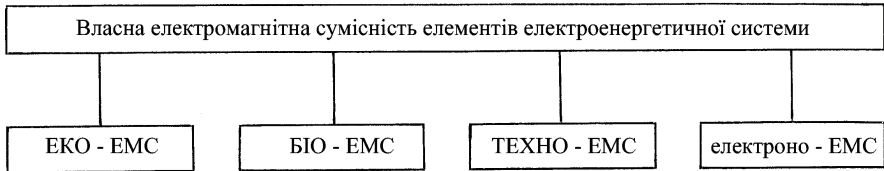


Рисунок 1 – Структурна схема проблеми електромагнітної сумісності

Тому, метою цієї роботи є визначення умови достатності та необхідності збереження власної (внутрішньої) електромагнітної сумісності електроенергетичної системи і усіх її підсистем (систем електропостачання) для забезпечення нормального функціонування.

**Дослідження літературних джерел.** Відповідно до визначення у нормативному документа [5], що діє в Україні, електромагнітне поле представляється особливим видом матерії. Але таке визначення явно суперечить філософському розумінню матеріальності природи, за якого матерія вважається універсальним будівельним матеріалом Природи, разом з Космосом. Очевидно, що будь-яке поле це такий стан певного об'єму матерії, за якого у ньому починають діяти сили цілком конкретного виду. З фізики [6] відомо, що це Кулонівські сили (діють між електричними зарядами) і сили Кариоліса, які діють при обертанні електронів в атомах діелектриків за їх поляризованого стану.

Атом – найменша матеріальна частинка простої речовини як електрично упорядкований об'єм фізичного вакууму, що налічує певну кількість фітонів (елементарних неподільних матеріальних частинок), частина яких має постійний позитивний заряд (+n), що утримує на круговій орбіті навколо себе еквівалентний негативний заряд, який складається з (-n) одиниць (електронів). Такий електричний зв'язок називається атомним або електронним. При цьому, кожна одиниця позитивного заряду ядра атому утримує на орбіті тільки одну одиницю негативного заряду – один електрон. За твердженням [7], такий зв'язок характерний для провідників ЕЕС.

Найменша матеріальна частинка складної речовини – молекула складається з атомів простих речовин, які об'єднані електричним зв'язком, що створюється між атомами простих речовин при хімічних реакціях. Такий електричний зв'язок називається молекулярним. При цьому, кожна одиниця позитивного заряду кожного атому молекули утримує на круговій орбіті ко-

жного атому кожен електрон усіх атомів молекули. За твердженням [7], такий зв'язок характерний для діелектричного середовища, що оточує усі струмоведучі частини ЕЕС.

Під дією різниці потенціалів (напруги) в провідному і діелектричному середовищі ЕЕС відбуваються процеси поляризації, за яких кругові орбіти електронів їх атомів набувають овальної форми. При цьому у такому стані середовища у ньому створюються струми зміщення і струми провідності. Очевидно, що їх співвідношення можуть слугувати характеристиками, що визначають електричні властивості електротехнічних матеріалів ЕЕС.

Відносне значення струму зміщення такого матеріалу можна визначити через відношення густини об'ємного струму зміщення  $\delta_{3M}$  до густини об'ємного струму провідності  $\delta_{PP}$ , в.о.

$$i_{3M}^* = \delta_{3M} / \delta_{PP}. \quad (1)$$

За даними [2], для діелектричного середовища  $i_{3M}^* = 278$  в.о., а для провідного  $i_{3M}^* = 5,6 \cdot 10^{-6}$  в.о. Тобто, діелектричне середовище (на відміну від провідного) є електропружним, у якому можуть існувати електромагнітні поля усіх електроустановок ЕЕС, створюючи її загальне електромагнітне поле.

Як відомо, потужність такого поля в площинці, що спирається на елемент довжини електропередачі  $\partial l$ , визначається за теоремою Пойтинга,  $ВА/м^2$

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H}, \quad (2)$$

де  $\vec{E}$  – вектор напруженості електричного поля електропередачі, В/м;  $\vec{H}$  – вектор напруженості магнітного поля електропередачі, А/м.

Зважаючи на те, що за змінної синусоїдальної напруги і такого ж струму провідності електропередачі  $\vec{E} \equiv \vec{U}$  та  $\vec{H} \equiv \vec{I}$ , спираючись на рівняння (2), для миттєвих значень напруги і струму провідності, що відстає від напруги електропередачі на фазовий кут  $\varphi$  можна написати, кВА

$$\begin{aligned} s &= u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = 2 \cdot (UI \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)) = \\ &= 2 \cdot (UI \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi)) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi), \end{aligned} \quad (3)$$

де  $U_m$  – амплітудне значення синусоїдальної напруги електропередачі, кВ;  $I_m$  – амплітудне значення синусоїдального струму електропередачі, А;  $U$  – діюче значення синусоїдальної напруги електропередачі, кВ;  $I$  – діюче значення синусоїдального струму електропередачі, А.

Як можна бачити, ЕЕ електропередачі створюється у її електрично пружному діелектричному середовищі одночасною дією на нього напруги і струму провідності, а її повна потужність має дві складові:

Активна потужність, кВт

$$P = UI \cos \varphi . \quad (4)$$

Реактивна потужність, квар

$$Q = UI \cos(\omega t - \varphi) = UI \sin \varphi . \quad (5)$$

Повна потужність, кВА

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} . \quad (6)$$

Графічно, залежність рівняння (3) представлено на рис.2.

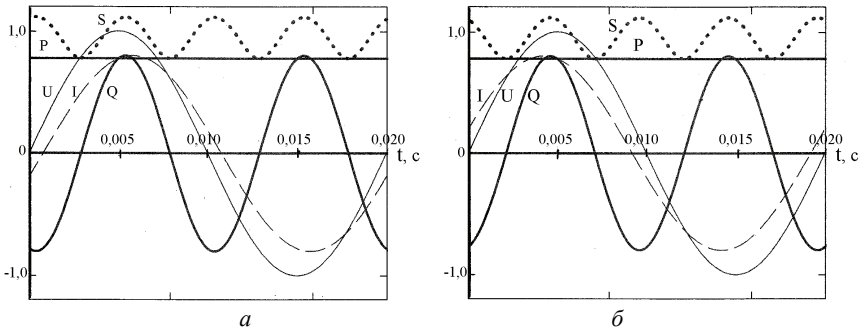


Рисунок 2 – Складові потужності електропередачі ЕЕС: *а* – струм відстає від напруги; *б* – струм випереджає напругу

Як можна бачити, активна потужність протягом періоду зміни напруги електропередачі є величиною незмінною і передається до споживача. Реактивна потужність за цей же час двічі змінює величину від нуля до максимального значення, намагається передаватись у середину струмоведучих частин, створюючи при цьому електрорушійну силу (ЕРС) самоіндукції, яка впливає на рівень напруги електропередачі. Тобто, реактивна потужність це внутрішня потужність ЕЕС, яка ні до споживача, і від нього, фізично, передаватись не може.

Якщо синусоїдальність струму навантаження електропередачі спотворюється (наприклад, через не лінійність опору навантаження), то спотворюється і синусоїдальність напруги електропередачі (через несинусоїдальність її електрорушійної сили самоіндукції). Якщо потужність нелінійного навантаження наближається до потужності джерела живлення, то спотворюється і синусоїдальність напруги такого джерела.

Таким чином, фізично, ЕЕ електропередачі є енергією поляризації її діелектричного середовища одночасною дією на нього напруги і струму провідності електропередачі і, через свою реактивну складову, має вигляд хвилі, що біжить від джерела живлення до споживача.

Зважаючи на пріоритетність напруги у такому процесі можна зробити висновок про те, що як товарна продукція ЕЕС, ЕЕ це робота, яку виконують генератори електростанцій системи для створення напруги на їх затискачах.

Приймаючи до уваги, що така напруга це різниця потенціалів електромагнітного поля системи, очевидно, що її можна вважати потенціальною формою ЕЕ електропередач, а показники її якості у нормальному режимі роботи ЕЕС можуть слугувати показниками рівня її власної електромагнітної сумісності, що підтверджується вимогами [8]. При цьому, найпершими показниками якості напруги (ЕЕ) можна вважати її частоту і рівень напруги джерела живлення електропередачі, які (за даними [9]), суттєво залежать від статичних характеристик вузлів комплексного навантаження споживача. Такі характеристики наведено на рис. 3.

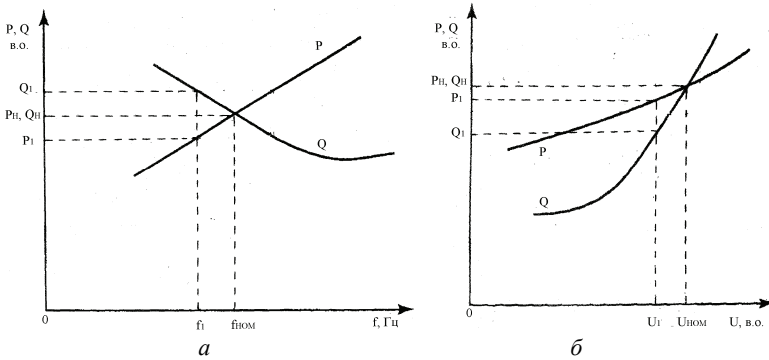


Рисунок 3 – Статичні характеристики комплексного навантаження: а – за частотою; б – за напругою

Тобто, у кожному вузлі ЕЕС, у кожен момент часу її роботи активна і реактивна потужність, генерована елементами системи повинна відповідати потужності навантаження (потужності споживачів електроенергії) разом з їх втратами. Таке співвідношення між вказаними потужностями називають енергетичним балансом вузла, який повинна забезпечувати ЕЕС.

Активний баланс вузла можна записати як

$$\Sigma P_{\Gamma} = \Sigma P_H + \Sigma P_{ВП} + \Sigma \Delta P = \Sigma P_{СП}, \quad (7)$$

де  $\Sigma P_{\Gamma}$  – сумарна активна «генерована» потужність ЕЕС;  $\Sigma P_H$  – активне навантаження споживачів;  $\Sigma P_{ВП}$  – сумарна активна потужність власних потреб ЕЕС;  $\Sigma \Delta P$  – втрати активної потужності в мережах ЕЕС;  $\Sigma P_{СП}$  – сумарна активна потужність споживачів.

Відповідно до (7) реактивний баланс вузла можна представити як

$$\Sigma Q_{\Gamma} = \Sigma Q_H + \Sigma Q_{ВП} + \Sigma \Delta Q_M - \Sigma Q_C - \Sigma Q_K = \Sigma Q_{СП}, \quad (8)$$

де  $\Sigma Q_{\Gamma}$  – сумарна реактивна «генерована» потужність ЕЕС;  $\Sigma Q_H$  – реактивне навантаження споживачів;  $\Sigma Q_{ВП}$  – реактивна потужність власних потреб ЕЕС;  $\Sigma \Delta Q_M$  – «втрати» реактивної потужності в мережах ЕЕС;  $\Sigma Q_C$  – заряд-

на потужність ліній електропередач при напрузі 110 кВ та вище;  $\Sigma Q_K$  – сумарна реактивна потужність пристроїв реактивної компенсації;  $\Sigma Q_{СП}$  – сумарне реактивне навантаження споживачів.

Оскільки ЕЕ безпосередньо приймає участь при створенні продукції інших видів у споживачів, то її якість повинна суворо відповідати вимогам нормативних документів. Нажаль, обов’язкова її сертифікація проводиться тільки по відношенню до відхилення частоти і напруги джерел живлення споживачів. Але їх збиток від порушення умов електромагнітної сумісності в мережах споживачів не контролюється, [10].

За даними [11], в 2006 – 2007 р.р. в країнах Європейського Союзу збиток від порушення умов електромагнітної сумісності (провали напруги, короткотривалі і довготривалі перерви електропостачання, вищі гармоніки, перенапруги, флікери, короткі замикання) складав величину понад 150 млрд. євро. Тому в [12] пропонується створити спеціальний центр управління якістю ЕЕ на державному рівні.

### **Висновки.**

1. Електроенергія як товарна продукція ЕЕС це робота, яку виконують генератори її електростанцій для створення напруги на своїх затискачах.

2. Напруга електропередачі – потенційна форма її електроенергії тому показники її якості є показниками електроенергії.

3. Нормальна робота електропередачі можлива лише тоді, коли показники якості її напруги відповідають нормам державного стандарту, який гарантує електромагнітну сумісність електроустановок електропередачі.

4. Умови електромагнітної сумісності електропередачі необхідно розглядати у двох аспектах – як достатні і необхідні.

5. Умова достатності електромагнітної сумісності електропередачі – наявність трифазної симетричної і синусоїдальної напруги, діюче значення якої не виходить за межі  $(1 \mp 0,1)U_{НОМ}$  кВ, а її частота за межі  $(1 \mp 0,4)f_{НОМ}$  Гц, усі інші вимоги ДЕСТу – умови необхідності.

6. Відповідальність за умови достатності електромагнітної сумісності електропередачі є прерогативою ЕЕС, яка закріплюється у договорі на користування ЕЕ між електропостачальною організацією і споживачами.

7. Відповідальність за умови необхідності електромагнітної сумісності електропередачі – прерогатива споживачів, яка закріплюється у договорі на користування ЕЕ між електропостачальною організацією і споживачами. 8. Нормативні документи України з електромагнітної сумісності потребують переробки.

**Список літератури:** 1. ПУЕ 2009. Правила улаштування електроустановок. 2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники / Л.А. Бессонов. – Изд. 6-е. Учебник для студ. энергетич. и электротехнич. вузов. – М.: Высш. школа, 1973. – 752 с. 3. Дорошенко О.І. Про фізику електромагнітного поля електроенергетичної системи / О.І. Дорошенко // Матеріали XI міжнарод-

дної науково-технічної конференції «Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів». – Кременчук, 2–4 листопада 2012 р. – С. 33 – 35. **4.** Електромагнітна сумісність у системах електропостачання: Підручник / *І.В. Жежеленко, А.К. Шидловський, Г.Г. Півняк, Ю.Л. Сасенко*. – Нац. гірнич. ун-т, 2009. – 319 с. **5.** ДСТУ 2843–94. Державний стандарт України. Електротехніка. Основні поняття. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1995. – 66 с. **6.** *Ландау Л.Д.* Курс общей физики. Механика и молекулярная физика / *Л. Д. Ландау, А.И. Ахиезер, Е.М. Лифшиц* // М.: Изд. Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1969. – 399 с. **7.** Богородицкий Н.П. Электротехнические материалы: Учебник для вузов. 7-е изд. / *Н.П. Богородицкий, В.В. Пасынков, В.М. Тареев* // Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ие, 1985. – 304 с. **8.** ГОСТ 13109. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск. Издательство стандартов, 1998. – 31 с. **9.** Веников В.А. Переходные электрохимические процессы в электрических системах. – М.: Высшая школа, 1985. – 427 с. **10.** Управление качеством электроэнергии / *И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов* и др.; под ред. *Ю.В. Шарова*. – М.: Издательской дом МЭИ, 2006. – 320 с. **11.** Gargosz R. (European Copper Institute, Poland) and Manson J. (GEL Consulting, United Kingdom). – 19th Inter. Conf. on Electricity Distribution (CIRED). – Vienna, 21 – 24. May 2007. **12.** *Карташев И.И.* Системный подход к управлению качеством электрической энергии / *И.И. Карташев, Д.С. Подольский* // Электричество. – 2009. – № 5. – С. 2-7.

**Bibliography (transliterated):** **1.** Rules of arrangement of electrical installations. – Kharkov: Pu,linhig house «Fort», 2009. – 704 P. **2.** Bessonov L.F. Theoretical foundations of electrical engineering / L.A. Bessonov. Ed. 6-that is, a Textbook for student's energy and electrotechnics. – M.: The High school, 1973. – 752 P. **3.** Doroshenko A.I. On physics of electromagnetic floor electric power system / A.I. Doroshenko // «Fiscal processes and fields of technical and biological objects». Kremenchug, 2 – 4 November 2012. – P. 33 – 35. **4.** Electromagnetic compatibility in power supply systems. Textbook / *I.V. Gegelenko, A.K. Shydlovski, G.G. Pivnyak, U.L. Saenko*. – D., The NAC girmic. University, 2009. – 319 P. **5.** DSTU 2843-94. The state standard of Ukraine. Electrical engineering. Basic concepts. Terms and definitions. Kiev. State standard of Ukraine, 1995/ - 66 P. **6.** Landau L.D. Course of General physics. Mechanics and molecular physics. / *L.D. Landau, A.I. Akhieser, E.M. Lifshits*. – M.: Izd. «Science». Editorial of physic-mathematical literature. -1960. – 399 P. **7.** Bogoroditsky N.P., Pasinkov V.V., Tareev B.M. Electrometrical materials. Textbook for universities. -7-th ed. – Leningrad: Energoatomizdat. Leningrad separation, 1985. -304 P. **8.** GOST 13109. Interstate standard. Electrical energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Norms of quality of electric energy in power supply systems of General purpose. Minsk. Standards publishing house, 1998. – 31 P. **9.** V.A. Venikov, Transient electromechanical processes in electric systems. - M.: «High school», 1985. – 427 P. **10.** Quality management energy /*I.I. Kartashev, V.N. Tulsiky, R.G. Shamonov* and others, edited by Y. Sharov. – M.: Publishing of Moscow power engineering Institute, 2006. – 320 P. **11.** Gargosz R. (European Copper Institute, Poland) and Manson J. (GEL Consulting, United Kingdom). – 19th Inter. Conf. on Electricity Distribution (CIRED). – Vienna, 21 – 24. May 2007. **12.** Kartashev I.I. System approach to the management of quality of electrical energy / *I.I. Kartashev, D.S. Podolsky* // Electricity. - № 5. – 2009. – P/ 2 – 7.

*Поступила (received) 15.09.2014*

УДК 621.371: 621.314.4

**Про фізику власної електромагнітної сумісності електроенергетичної системи / О.І. Дорошенко** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 66-72. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

Зважаючи на те, що робочим органом електроенергетичної системи є її електромагнітне поле, яке може існувати лише у її діелектричному середовищі, що оточує струмоведучі частини системи і складається з електромагнітних полів усіх її електроустановок, пропонується у поняття електромагнітної сумісності таких систем вкладати їх спроможність до нормального функціонування за умови нормального навантаження усіх їх електроустановок з визначенням рівня допус-

тимості та необхідності такої сумісності.

**Ключові слова:** електроенергетична система, електромагнітне поле, електромагнітна сумісність, умови достатності і необхідності електромагнітної сумісності.

УДК 621.371: 621.314.4

**О физике собственной электромагнитной совместимости электроэнергетической системы / А.И. Дорошенко** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 66-72. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2079-0740.

В связи с тем, что рабочим органом электроэнергетической системы есть ее электромагнитное поле, которое может существовать лишь в ее диэлектрической среде, окружающей токоведущие части системы и состоящее из электромагнитных полей всех ее электроустановок, предлагается в понятие электромагнитной совместимости таких систем вкладывать их способность к нормальному функционированию при условии нормальной наружки всех их электроустановок с определением уровня допустимости и необходимости такой совместимости.

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, электромагнитное поле, электромагнитная совместимость, условия допустимости и необходимости электромагнитной совместимости.

**On Physics of Electromagnetic Compatibility of Electrical System / A.I. Doroshenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 66-72. – Bibliogr.: 12. – ISSN 2079-0740.

In connection with the fact that the working body of the electric power system has its electromagnetic field, which can only exist in its dielectric srede, environmental conductive parts of the system and consisting of electromagnetic fields all its installations, it is proposed in the concept of electromagnetic compatibility of such systems to invest their ability to normal operation normal load them all electrical installations with the determination of the level of permissibility and necessity of such compatibility.

**Keywords:** power system, electromagnetic field, electromagnetic compatibility, the admissibility conditions and the need for electromagnetic compatibility.