

УДК 621.311

Т. М. СЕРДЮК^{1*}, М. С. СЕРЧЕНКО^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел.пошта t.m.serdiuk@ust.edu.ua, ORCID 0000-0002-2609-4071

^{2*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел.пошта serchenko228@gmail.com, ORCID 0009-0007-7076-6211

Аналіз параметрів якості електричної енергії та пристроїв для їх вимірювання

Мета. Основна мета цього дослідження – дати оцінку явищам, які впливають на параметри якості електричної енергії (ПЯЕ), розглянути способи протидії погіршенню ПЯЕ, оцінити вплив електромагнітних завад на тіло людини, виконати огляд наявних пристроїв для вимірювання параметрів електричної енергії. **Методика.** Для отримання релевантних даних автори провели огляд літератури за темою роботи з використанням повнотекстових і реферативних баз даних. Розглянуто основні причини порушення електромагнітної сумісності (ЕМС) та способи протидії цим порушенням. Виділено основні параметри якості електричної енергії, умови для їх вимірювання та допустимі діапазони згідно з держстандартами України (ДСТУ). Проведено огляд пристроїв для вимірювання параметрів якості електричної енергії та пошук відповідного, який задовольняє українським стандартам. **Результати.** Автори довели: 1) проблема вимірювання параметрів якості електричної енергії є актуальною та важливою для її точного обліку; 2) контроль параметрів якості електроенергії та дотримання держстандартів дозволяє уникнути негативного впливу на систему електропостачання; 3) використання сучасних цифрових пристроїв вимірювання надає більшу точність вимірювання, ніж аналогові, до того ж вони здатні враховувати більшу кількість параметрів за одне вимірювання. **Наукова новизна.** Автори провели дослідження в галузі електромагнітної сумісності з використанням цифрового пристрою, що дає більш точні та надійні результати параметрів якості електричної енергії. **Практична значимість.** На основі отриманих результатів можна як корегувати особисті дослідницькі розвідки окремих вчених чи колективів науковців, так і прогнозувати подальші перспективи розвитку предметного напрямку «Електромагнітна сумісність» у системах тягового електропостачання на залізничному транспорті. Дослідження також можуть бути корисними під час вивчення дисциплін «Електромагнітна сумісність систем залізничної автоматики» та «Електричні кола та лінії залізничної автоматики», організації науково-практичних семінарів, курсів підвищення кваліфікації тощо.

Ключові слова: параметри якості електричної енергії; електромагнітна сумісність; прилади; гармоніки; напруга; струм; потужність

Вступ

Проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) в наш час має велике значення для електроенергетики як у теоретичному, так і в практичному плані. Зокрема, існує проблема якості електричної енергії, тобто дотримання параметрів якості електричної енергії. Значимість цієї проблеми настільки ж велика, як і відомі проблеми екології, енергетичної безпеки та енергоресурсозбереження. Її економічний характер свідчить про величезні збитки через невиконання вимог ЕМС. За різними оцінками, щорічні збитки сягають від 100 до 500 млрд євро [8].

Вимірювання якості електроенергії є найважливішим завданням у дотриманні безпечної та ефективної роботи електричних систем. Останнім часом попит на якісну електроенер-

гію зростає у зв'язку з широким використанням чутливої електронної техніки, такої як комп'ютери, медичні прилади та системи зв'язку. Неналежна якість електроенергії може призвести до відмови обладнання, втрати даних і навіть травм. Отже, необхідно вимірювати і контролювати параметри якості електроенергії (ПЯЕ), щоб забезпечити правильну роботу електричної системи. Вимірювання параметрів якості електроенергії важливе не тільки для безпечної роботи електричних систем, а й для ефективного використання енергії. Погана якість електроенергії може призвести до розтрати енергії та непотрібних витрат, а також до забруднення навколишнього середовища через підвищене споживання енергії. Вимірюючи і контролюючи якість електроенергії, можна

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

оптимізувати споживання енергії та знизити витрати, а також сприяти екологічній стійкості.

Крім того, потреба у вимірюванні якості електроенергії стає дедалі важливішою, оскільки поновлювані джерела енергії, такі як сонячна та вітрова енергія, інтегруються в електричну мережу. Мінливість цих джерел енергії може впливати на якість електроенергії, тому важливо контролювати і регулювати ПЯЕ для забезпечення стабільної та надійної роботи електричної системи. Таким чином, вимірювання параметрів якості електроенергії має вирішальне значення для досягнення безпечної та ефективної роботи електричних систем, підвищення енергоефективності та екологічної стійкості, а також інтеграції поновлюваних джерел енергії. Оскільки технології продовжують розвиватися, а електричні системи стають дедалі складнішими, важливість вимірювання якості електроенергії тільки зростатиме.

Мета

Основною метою наукової роботи є дати оцінку явищам, які впливають на параметри якості електричної енергії, розглянути способи протидії погіршенню ПЯЕ, оцінити вплив електромагнітних завод на тіло людини, зробити огляд наявних пристроїв для вимірювання параметрів електричної енергії.

Предмет дослідження – параметри якості електричної енергії та прилади для їх вимірювання.

Методика

Зазначену проблему широко досліджено в роботах, що присвячені електроживленню тягових систем.

У роботі В. І. Гаврилюка дано короткий огляд питань якості електроенергії на електрифікованих залізницях і відповідних стандартів, наведено основні порушення якості електричної енергії [13].

У роботі Т. М. Сердюк були розглянуті проблеми, пов'язані з енергоефективністю тягових і нетягових мереж, та заходи щодо збереження і поліпшення якості електроенергії [9].

Також у спільній роботі авторів В. Сиченко, Є. Косарева та ін. було проведено дослідження ПЯЕ на шинах власних потреб тягових підста-

нцій постійного та змінного струму та описано важливість дотримання цих показників [10].

Причини порушення ЕМС. Під час експлуатації високовольтного обладнання виникають проблеми, які пов'язані з ЕМС первинних (силових) та вторинних кіл (пристрої релейного захисту та автоматики (РЗА), пристрої високо-частотного зв'язку (ВЧЗ), режимної та протиаварійної автоматики (ПА)). Вторинні кола мають робочу напругу, яка не перевищує сотні вольт, тобто на три порядки нижче, ніж у первинних колах системи електропостачання. Тому для вторинних кіл виникає небезпека впливу завод, замикань, грозових перенапружень, розрядів статичної електрики та ін. Найбільш тяжкі та часті порушення нормальної роботи електричної мережі 110 кВ та виникають у наслідок впливу розрядів блискавки. Короткочасна напруга в місці удару блискавки може досягати мільйонів вольт, чого достатньо для пробоя ізоляції практично будь-якої мережі. Для захисту від прямих ударів блискавки над дротами мережі встановлюють троси, а на підстанціях – вертикальні блискавковідводи. Для захисту від зворотного перебиття з опори на дроти необхідно кожен опору заземлити з невеликим опором заземлення, приблизно до 10 Ом. Для захисту обладнання підстанцій застосовують спеціальні розрядники або обмежувачі перенапруження (ОПН) [7].

Перехідні процеси та перенапруга наявні в будь-якій електроустановці та є одним з основних джерел аварій у мережах високої напруги. Як правило, вони мають вид затухаючих коливань, проходять через трансформатори та автотрансформатори в мережі іншої напруги та розповсюджуються на великі відстані, зв'язані електрично з місцем появи.

Аварії та оперативні комутації викликають небезпечний та заважаючий вплив кіл високої напруги «первинної комутації» на кола «вторинної комутації» з електронними пристроями інформаційної та комп'ютерної техніки електростанцій та підстанцій високої напруги. Вони можуть призвести до виходу з ладу пристроїв вторинної комутації у найбільш відповідальний момент аварії кіл первинної комутації, коли від кіл вторинної комутації потребується чітка, селективна та безперервна робота [7].

Параметри якості електроенергії. Якість електроенергії є важливим аспектом електро-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

технічних систем. Вона відповідає певним вимогам і нормам, які встановлені регуляторними органами й орієнтовані на досягнення безпеки та ефективності електричних пристроїв.

Одним із параметрів якості електроенергії є рівень напруги:

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Нормативи встановлюють допустимі відхилення напруги від заданого рівня. Зміни в навантаженні, рівнях напруги та інших факторах можуть призводити до змін у напрузі в різних точках мережі. Для забезпечення стабільної роботи електричних пристроїв, важливо дотримуватись установлених норм для рівня напруги [3].

Коливання напруги є ще одним аспектом, який визначає якість електроенергії:

$$\rho U = \frac{U_{\text{min}} - U_{\text{max}}}{U_{\text{max}}} \cdot 100 \% \quad (2)$$

Якщо напруга змінюється занадто швидко, то це може вплинути на працездатність інших електричних пристроїв. Допустимі відхилення від заданого рівня напруги залежать від типу пристрою, їх встановлюють відповідно до нормативних документів. Коливання напруги мають фіксовані межі, які гарантують надійну роботу електричних систем.

Ще одним аспектом, що впливає на якість електроенергії, є флікер. Флікер відчувається як миготіння чи мерехтіння світла, що може викликати роздратування та погіршення зору [3]:

$$P_{fl} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \leq 1. \quad (3)$$

Встановлені норми для рівня флікеру, які залежать від типу лампи чи пристрою, дозволяють забезпечити комфортні умови для споживачів електричної енергії.

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (NAEN), або коефіцієнт несинусоїдальності, визначають шляхом порівняння діючого значення напруги з усіма гармоніками, які наявні в цій напрузі, з дійсним значенням першої гармоніки (50 Гц):

$$K_v = \frac{1}{U_{\text{ном}}} \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^N U_n^2} \cdot 100 \% = \frac{U_v \Sigma}{U_1} \quad (4)$$

У формулі для розрахунку коефіцієнта несинусоїдальності також використовують порядок останньої врахованої гармоніки та дійсне значення кожної гармоніки.

Нормальні й максимальні значення коефіцієнта несинусоїдальності повинні відповідати певним обмеженням залежно від рівня напруги в електричній мережі. Для напруги до 1 кВ ці обмеження становлять 5 і 10 % відповідно, для напруги 6...20 кВ – 4 і 8 %, для напруги 35 кВ – 3 і 6 %, а для напруги 110 кВ і вище – 2 і 4 % [4].

Напруга гармонік є синусоїдальною напругою з частотою, що становить множник основної частоти (50 Гц) напруги електропостачання:

$$NEAN = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_2)^2} \quad (5)$$

Їх можна виміряти за допомогою відносної амплітуди окремої гармоніки відносно амплітуди основного складника напруги. Також для оцінки напруги гармонік можна використовувати сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень СКГС (NEAN), який порівнює загальну спотворену напругу з дійсним значенням першої гармоніки.

Напруга інтергармонік є синусоїдальною напругою з частотою, коефіцієнт пропорційності якої до основного складника напруги не є цілим числом. Рівень інтергармонік зазвичай зростає в енергосистемах низької і середньої напруги (1–35 кВ) через використання нових технологій і перетворювачів частоти. Інтергармоніки низького рівня можуть впливати на якість електричного струму, який використовують у системах із моделюванням звуків.

Відхилення частоти визначають так:

$$\Delta f = f - f_{\text{ном}} \quad \text{або} \quad qf = \frac{f - f_{\text{ном}}}{f_{\text{ном}}} \cdot 100 \% \quad (6)$$

Відхилення частоти раніше регулювали більш жорстко. Вони негативно впливають на роботу електроніки: збільшення частоти понад +0,1 Гц призводить до спотворень зображення, наприклад, на екрані телевізора, а зниження частоти від 49,9 до 49,5 Гц збільшує розмах телевізійного сигналу. Крім того, частота має важливе значення для роботи електродвигунів,

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

трансформаторів і реакторів зі сталевими сердечниками.

Згідно з нормами ДСТУ EN 50160:2014, для систем, підключених до зовнішнього електропостачання, частота повинна бути $50 \text{ Гц} \pm 1 \%$ протягом 99,5 % часу за рік, а під час вимірювання – $50 \text{ Гц} +4...-6 \%$ [4]. Для систем, що не підключені до зовнішнього електропостачання, граничні значення відхилення частоти становлять $\pm 2 \%$ протягом 95 % часу за тиждень і $\pm 15 \%$ протягом 100 % часу вимірювання.

Провали напруги й перенапруги виникають у випадкових аварійних ситуаціях або в разі перемикачів навантаження. Поріг початку провалу напруги зазвичай становить 90 % від номінальної напруги, а поріг початку перенапруги – 110 %. Оцінку провалів напруги здійснюють відповідно до стандарту EN 61000–4–30 залежно від поставленої мети оцінки [6].

Небаланс напруги або напругу зворотної послідовності визначають як коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю (K_{2U}). Згідно зі стандартом ГОСТ 13109–97, K_{2U} повинен бути не більше 2 % протягом 95 % часу вимірювання та не більше 4 % протягом 100 % часу вимірювання від напруги прямої послідовності, яка є основним складником. Однак стандарт ДСТУ EN 50160:2014 встановлює більш жорсткі вимоги, дозволяючи лише 3 % від напруги прямої послідовності для K_{2U} .

Усі ці вимоги до якості електроенергії спрямовані на досягнення безпеки та якісної роботи електроприладів. Відповідна якість електроенергії впливає на ефективність і тривалість роботи пристроїв, а також забезпечує комфортні умови для користувачів [3, 4, 11].

Прилади вимірювання показників ЕМС. Згідно з вимогами МЕК, параметри ЕМС обов'язково потрібно контролювати шляхом відхилення частоти та напруги K_{2U} та $K_{U(n)}$ [5].

Вимірювання цих параметрів потрібно проводити згідно з вимогами для класів А та В.

Вимірювальний пристрій може мати різні класи вимірювання для різних параметрів.

Прилади для вимірювання та оцінки результатів вимірювання параметрів якості електроенергії зазвичай мають функціональний ряд, який складається з таких основних елементів: вимірювальні перетворювачі; пристрої вимірювання; пристрої оцінки результатів вимірю-

вання. Узагальнену структурну схему приладу для вимірювання ПЯЕ подано на рис. 1.

Для вимірювання показників ЕМС застосовують як однофункціональні прилади, призначені для вимірювання одної характеристики ЕМС або одного параметру якості, багатфункціональні прилади та системи, так звані аналізатори показників якості електроенергії, що дозволяють вимірювати та оцінювати декілька характеристик чи ПЯЕ. Широко застосовують комп'ютерні вимірювальні системи.



Рис. 1. Структурна схема приладу для вимірювання ПЯЕ

Fig. 1. Schematic diagram of the device for measuring the PQA

У наш час виробляють та експлуатують вимірювальні прилади й системи, основані на цифровій техніці. Як приклад можна розглянути аналізатор якості енергії PM175, призначений для вимірювання та реєстрації основних параметрів електричної енергії та потужності, у тому числі показників якості електричної енергії, у системах електропостачання загального призначення [2].

Аналізатори можуть бути під'єднані через вимірювальні трансформатори струму та напруги. Основним їх застосуванням є моніторинг та запис параметрів енергії в мережах низької та середньої напруги. Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175 подано на рис. 2.



Рис. 2. Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175

Fig. 2. Analyser of power quality parameters SATEC PM175

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

PM175 вимірює, обчислює і реєструє всі показники якості електричної енергії, визначені в ДСТУ OIML D11:2012, ДСТУ EN 62052–11:2015, ДСТУ EN 62053–22:2015 [5]:

1) сталі відхилення напруги в режимах найбільшого, найменшого і добового навантаження;

2) викривлення синусоїдальності кривої напруги;

3) коефіцієнт n -ої гармонійної складової напруги;

4) несиметрія напруг зворотної та нульової послідовності;

5) відхилення частоти;

6) розмах зміни напруги та дозу флік ера;

7) провали напруги;

8) імпульсну напругу й тимчасові перенапруги;

9) має клас точності 0.2S.

Також для вимірювання параметрів якості електричної енергії використовують аналізатор PQM–700UA (рис. 3), характеристики якого наведено нижче [1].



Рис. 3. Аналізатор параметрів якості електроенергії PQM–700UA із сертифікатом класу S

Fig. 3. Analyser of power quality parameters PQM–700UA with class S certificate

Аналізатор параметрів якості електричної енергії використовують для проведення реєстрації та аналізу основних параметрів якості електричної енергії в мережах електропостачання.

PQM–700UA – це пристрій, призначений для вимірювання та аналізу основних параметрів якості електричної енергії в мережах із частотою 50/60 Гц. Він може працювати навіть у складних погодних умовах і не позначається електричними полями, що дозволяє його вста-

новлювати навіть безпосередньо на ЛЕП. Корпус має ступінь захисту IP65 для більшої надійності [1].

PQM–700UA може працювати в широкому температурному діапазоні від -20 до $+55$ С. Стабільну роботу в умовах негативних температур забезпечує вбудований підігрів. У разі відімкнення зовнішнього живлення пристрій продовжить працювати завдяки внутрішній Li-Ion акумуляторній батареї.

Також широко використовують пристрій контролю якості електроенергії SICAM P855 від компанії SIEMENS (рис. 4) [15].



Рис. 4. Пристрій контролю якості електроенергії SICAM P855

Fig. 4. SICAM P855 power quality monitoring device

Багатофункціональний пристрій SICAM P855 використовують для збору, відображення й передачі електричних величин, наприклад, змінної напруги і струму, потужності, гармоніки і т. д. Вимірювані величини і події реєструють і обробляють відповідно до вимог стандарту якості електроенергії MEK 61000–4–30. Отримані величини можна виводити на АРМ або в систему автоматизації/SCADA-систему через комунікаційні інтерфейси або відображати на дисплеї пристрою. Додатково до функції моніторингу пристрій SICAM P855 також виконує комбіновану функцію реєстрації та оцінки даних. Отримані величини можуть бути записані на вибраних інтервалах часу за допомогою різних засобів реєстрації, таких як реєстратор параметрів якості електроенергії або реєстратор аварійних подій. Довгострокові дані та події можна оцінити безпосередньо через веббраузер пристрою і відобразити у вигляді звіту відповідно до стандартів якості електроенергії (EN 50160 [4]).

Реєстрація отриманих значень відповідно до вимог стандарту з контролю якості електроене-

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

ргії МЕК 61000–4–30, включаючи мерехтіння, передбачас:

1) автоматичне складання звіту про якість електроенергії згідно з EN 50160;

2) функцію реєстрації середніх значень і аварійних подій;

3) експорт даних у форматі PQDIF і COMTRADE;

4) пам'ять 2 ГБ для зберігання даних реєстратора;

5) оцінку подій на HTML-сторінках через вбудований вебсервер.

Широкий спектр застосування має вимірювач потужності Yokogawa WT5000 в масштабах сучасної промисловості: електромобілі, відновлювальні джерела енергії, промислова робототехніка, побутова та офісна техніка, тестування трансформаторів, пристроїв компенсації реактивної потужності, сервоприводів, іншого силового та медичного обладнання [17].

Цей пристрій дозволяє вимірювати електричні параметри з високою точністю – похибка до 0,01 % показання +0,02 % в діапазоні 50...60 Гц або 0,02 % від показань +0,05 % діапазону постійного струму. Він є багатоканальним і дозволяє під'єднати одночасно до семи каналів для вимірювання вхідної потужності контролера та зміни вихідної потужності двигуна. Містить вбудовану функцію аналізу гармонік до 500 порядку на напругу, струм та потужність. Функція вимірювання гармонік може одночасно виконати вимірювання гармонік на вході контролера та вході двигуна.

З огляду на перелічені вище можливості та переваги пристроїв аналізу якості електричної енергії було обрано прилад Yokogawa WT5000 для проведення експериментальних досліджень.

Результати

Експериментальні дослідження. Для дослідження залежності параметрів якості електричної енергії від типу навантаження в низьковольтній мережі Українського державного університету науки і технологій 220 В частотою 50 Гц було вирішено скористатись аналізатором потужності Yokogawa WT5000 (рис. 5), який являє собою універсальну платформу і забезпечує виключну точність і продуктивність. Лабораторний експеримент було виконано на базі лабораторії групи силової електроніки й електромаг-

нітної сумісності Університету Твенте під керівництвом і за підтримки професора Франка Леферінка і доцента Баса тен Хева [16].

Прилад Yokogawa WT5000 є двадцяти каналним і забезпечує точні вимірювання: активної P , Вт, реактивної Q , вар, і повної S , ВА, потужностей; λ – коефіцієнта потужності, φ – фазового кута, f_U – частоти напруги живлення, Гц. Цей вимірювач потужності застосовують для точного вимірювання гармонік та визначення ефективності інверторів, обертальних електроприводів, освітлення, побутової техніки, офісного устаткування, джерел потужності в промисловому машинобудуванні. Прилад дозволяє виміряти такі параметри для контролю якості електроенергії: U_{rms} – напругу від 0...15 В і 0...1000 В; I_{rms} – струм 0...5 А і 0...30 А; частоту f_U до 1 МГц, споживану потужність, обертовий момент, швидкість обертання ротора двигуна з його оцінюванням.

Метою цього дослідження було спостереження за змінами параметрів якості електричної мережі університету, що є побутовим споживачем 2-ої категорії, у разі змінювання характеру навантаження від активного до активно-реактивного опорів: насос для басейну з десятьма режимами регулювання швидкості. На рис. 5 жовтою кривою показана напруга живлення, а зеленою – струм керування швидкістю обертання водяного насоса.

Результати дослідження виявили в системі електропостачання університету активно-емнісне навантаження, це видно за даними табл. 1. До того ж коефіцієнт потужності є дуже низьким, що не відповідає вимогам [3–7, 11]. У ряді випадків емнісне навантаження переважає над індуктивним, як наслідок струм випереджає напругу за фазою.



Рис. 5. Аналізатор потужності Yokogawa WT5000

Fig. 5. Yokogawa WT5000 power analyzers

Таблиця 1

**Результати вимірювання параметрів якості електроенергії
за допомогою аналізатора потужності Yokogawa WT 5000 power analyse**

Table 1

**Results of measuring power quality parameters with
the Yokogawa WT5000 power analyse**

До- сліджен- ня	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Максимальна напруга живлення $U=300$ [V]									
Максимальний струм живлення $I=20$ [A]									
U_{rms} [V]	228,78	226,303	226,949	226,619	226,684	226,621	227,395	227,577	227,468
I_{rms} [A]	1,0197	1,0182	1,8726	2,1364	2,1016	2,1445	1,8003	1,9261	1,9318
P [W]	106,2	104,52	102,74	90,94	88,97	90,78	76,2	65,98	66,02
S [VA]	233,3	203,41	424,99	484,91	476,41	486,0	409,38	438,3	439,93
Q [var]	-207,7	-205,3	-412,3	-475,5	-468,03	-477,4	-402,2	-433,3	-434,4
λ	0,455	0,453	0,242	0,188	0,187	0,187	0,186	0,15	0,15
φ [°]	62,918	63,022	76,010	79,174	79,237	79,235	79,272	81,343	81,359
fU [Hz]	50,007	50,021	50,026	49,998	50,005	50,006	50,011	50,009	50,004

За результатами досліджень можна зробити висновок, що коливання напруги і частоти не виходять за межі ДСТУ EN 50160:2014 [4]. Коефіцієнт потужності під час дослідження впливу характеру навантаження на параметри якості електричної енергії є меншим за встановлені норми, він повинен дорівнювати $\lambda=0,9\dots 1$. Це вимагає встановлення лічильників активної і реактивної потужності і компенсації збиткової реактивної потужності.

Недоліком виконаних досліджень є обмежена кількість виміряних параметрів якості електроенергії. Тобто для визначення гармонійного складу напруги і струму необхідно використовувати додаткове обладнання і методи вимірювання.

Отже, контроль параметрів якості електричної енергії та дотримання держстандартів дозволяє уникнути негативного впливу на систему електропостачання, підвищити точність обліку споживаної електроенергії за умовою використання сучасних цифрових пристроїв вимірювання, що надають більшу точність, ніж аналогові прилади, та здатні надавати резуль-

тати про більшу кількість параметрів за одне вимірювання.

Вплив електромагнітних завад на організм людини. Вплив електромагнітних завад на тіло людини обумовлено струмами, індукованими в тілі, які призводять до зміни різниці потенціалів між поверхнями мембран та нагрівання тканин.

Вплив магнітного поля залежно від частоти ілюструє рис. 6 [12], де продемонстровано такі ефекти впливу на організм людини:

- 1) поява миготіння на периферійних ділянках зору;
- 2) відчуття наявності поля;
- 3) порушення зору, головні болі;
- 4) порушення роботи серця;
- 5) порушення роботи нервової системи;
- 6) нагрів тканин при потужності 4 Вт/кг.

Таким чином, можна зробити висновок, що у випадку низькочастотних полів високої напруженості переважає вплив зміни різниці потенціалів на мембранах клітин, а за високо-частотних полів великої потужності переважає вплив нагрівання тканин.

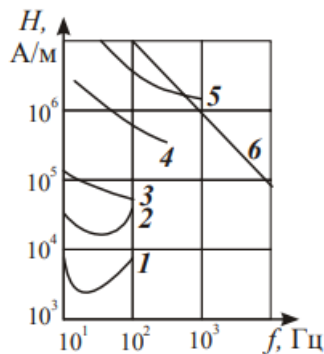


Рис. 6. Вплив магнітного поля на організм людини залежно від частоти

Fig. 6. Effect of magnetic field on the human body depending on frequency

Методика забезпечення електромагнітної сумісності. Як спосіб забезпечення електромагнітної сумісності та зниження рівнів показників якості електроенергії розроблені та створені фільтрокомпенсаційні пристрої.

Фільтрокомпенсаційні пристрої, побудовані на базі резонансних або складних комбінованих пристроїв, забезпечують фільтрацію вищих гармонік (ВГ) та інтергармонік (ІГ) і компенсацію реактивної потужності.

Фільтри поділяються на фільтри шуму, фільтри гармонік (активні та пасивні) тощо. Фільтри шуму використовують, щоб уникнути небажаних частотних сигналів струму або напруги (шуму) від чутливого обладнання. Цього можна досягнути за допомогою комбінації конденсаторів та індуктивностей, яка створює низький опір до основної частоти та високий імпеданс до вищих частот, тобто фільтр низьких частот. Фільтри гармонік використовують для зменшення небажаних гармонік. Пасивні фільтри складаються з низькоомного шляху до частот гармонік, які необхідно послабити за допомогою пасивних компонентів (індукторів, конденсаторів і резисторів) [14].

Ще більшими можливостями володіють активні фільтри, за допомогою яких можна зменшувати рівень інтергармонік.

Активні фільтри (АФ) є перспективними багатофункціональними пристроями, які забезпечують фільтрацію ВГ та ІГ, компенсацію реактивної потужності, зменшують глибину та тривалість провалів напруги, регулюють напругу у споживача. Загалом АФ являють собою джерело реактивного струму навантаження основ-

ної частоти, ВГ та ІГ і призначені для їх компенсації. Як активні фільтри використовують інвертори напруги, побудовані на тиристорах або транзисторах.

Наукова новизна та практична значимість

Під час дослідження було вирішено скористатись аналізатором потужності Yokogawa WT5000 як універсальною платформою, яка забезпечує найвищу точність та продуктивність. Цей прилад дозволив провести вимірювання низки найважливіших параметрів, включаючи напругу, струм, активну, реактивну та повну потужності, фазовий кут, а також частоту.

Результати дослідження виявили в системі перевагу ємнісного навантаження, що підтверджено аналізом вимірювання повної потужності. Це свідчить про те, що струм випереджає напругу за фазою.

Такий висновок становить важливе наукове відкриття, яке підкреслює, що в розглянутій системі переважають ємнісні характеристики, що має суттєве значення для оптимізації роботи електричних систем.

Результати цього дослідження мають вагоме значення сфері електроенергетики та електротехніки. Отримана інформація надає цінні дані для проєктувальників та інженерів, які працюють з електроенергетичними системами. Вони можуть використовувати ці дані для:

1. Ефективної експлуатації та налаштування систем (розуміючи домінантні ємнісні характеристики, фахівці можуть правильно регулювати параметри електричних систем, щоб досягти оптимального рівня продуктивності та надійності).

2. Запобігання можливим збоям та неполадкам (розуміння того, що ємнісне навантаження переважає, дозволяє вжити конкретних заходів для запобігання можливим проблемам, пов'язаним із цією особливістю системи).

3. Модернізації та поліпшення енергоефективності (одним із головних значень цього дослідження є здатність до точного аналізу системи, що надає можливість розробити та впровадити ефективні заходи для поліпшення енергоефективності).

4. Зменшення непотрібних витрат (інформація, отримана в ході дослідження, може служити основою для оптимізації споживання електроенергії, що призведе до значного зменшення непотрібних витрат).

5. Збереження навколишнього середовища (шляхом ефективного використання електроенергії можна зменшити негативний вплив на навколишнє середовище та сприяти його збереженню).

У цілому точне вимірювання та моніторинг параметрів якості електроенергії є невід’ємною частиною ефективної та стійкої роботи електричних систем у сучасному світі.

Крім того, дослідження підкреслює важливість використання сучасних і точних методів вимірювання якості електроенергії. Це дозволяє забезпечити стабільну та надійну роботу електричних систем, що є надзвичайно важливим.

Висновки

Належне вимірювання параметрів якості електроенергії необхідне для досягнення безпечної та ефективної роботи електричних систем, підвищення енергоефективності та скорочення непотрібних витрат. Крім того, це може допомогти запобігти забрудненню навколишнього середовища, спричиненому підвищеним споживанням енергії.

Тому важливо інвестувати в надійні і точні пристрої та методи вимірювання якості електроенергії, щоб забезпечити стабільну і надійну роботу електричних систем. Очікується, що в міру розвитку технологій пристрої для вимірювання якості електроенергії стануть ще досконалішими, це спростить і зробить ефективнішим вимірювання та контроль параметрів якості електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Аналізатор параметрів якості електричної енергії PQM-700UA з сертифікатом S клас.* URL: <https://sonel.ua/ua/p1567754-analizator-parametriv-yakosti.html>
2. *Аналізатор параметрів якості електроенергії SATEC PM175.* URL: <https://www.satec-global.com.ua/analizatori-yakosti/pm175/>
3. *ГОСТ 13109-97 Електрична енергія. Норми якості електричної енергії в системах електроживлення загального призначення.* [Чинний від 01.01.2000]. Київ : Держстандарт України, 1999. 31 с.
4. *ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT).* [Чинний з 1.10.2014]. Київ : Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.
5. *ДСТУ EN 62053-22:2015 Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 22. Лічильники активної енергії статичні (класів точності 0,2 S і 0,5 S) (EN 62053-22:2003, IDT).* [Чинний від 10.11.2022]. 2022. URL: http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page?id_doc=74517
6. *ДСТУ IEC 61000-4-30:2010 Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (IEC 61000-4-30:2008, IDT).* [Чинний з 01.07.2012]. Київ : Держстандарт України, 2016.
7. *Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕ).* URL: <https://www.diagram.com.ua/list/44.shtml#pte>
8. Про затвердження плану заходів з реалізації етапу «Реформування енергетичного сектору (до 2020 року)» Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». *Верховна Рада України*, 2018. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/497-2018-%D1%80#Text>
9. Сердюк Т. Електромагнітна сумісність і аналіз параметрів якості електричної енергії споживачів тягових підстанцій. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2019. № 17. С. 48–60.
10. Сиченко В., Косарев С., Кузнецов В., Малиш С., Кордін А., Данилов А., Полях О., Курочка О. Якість електричної енергії на шинах власних потреб тягових підстанцій електрифікованих залізниць. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 16. С. 57–61.

11. *СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго*. [Чинний від 03.02.2021]. 2021.
URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=94285
12. *СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55:2011 Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення*. [Чинний від 29.01.2012]. Київ : Міненерговугілля, 2012. 98 с.
13. Havryliuk V. I. A review of power quality issues in electrified rails. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2017. № 14. С. 11–20. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2017/137704>
14. Kumar P. A Review of power Quality Problems, Standards and Solutions. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2017. Vol. 04. Iss. 01. P. 1765–1775.
15. *Siemens Sicam P855 7KG85 Series Device Manual*.
URL: <https://www.manualslib.com/manual/1581656/Siemens-Sicam-P855-7kg85-Series.html>
16. ten Have B., Hartman T., Moonen N., Keyer C., Leferink F Faulty Readings of Static Energy Meters Caused by Conducted Electromagnetic Interference from a Water Pump. *Renewable Energy and Power Quality Journal*. 2019. Vol. 17. P. 15–19. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj17.205>
17. *WT5000 Precision Power Analyzer*. URL: <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/power-analyzers/wt5000/>

T. M. SERDYUK^{1*}, M. S. SERCHENKO²

^{1*}Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail serduchecket@gmail.com, ORCID 0000-0002-2609-4071

²Dep. «Automation and Telecommunications», Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail serchenko228@gmail.com, ORCID 0009-0007-7076-6211

Analysis Of Power Quality Parameters and Devices for Their Measurement

Purpose. The main objective of this study is to assess the phenomena that affect the parameters of power quality, to consider ways to counteract the deterioration of power quality, to assess the effect of electromagnetic interference on the human body, and to review the available devices for measuring the parameters of electric energy. **Methodology.** To obtain relevant data, the authors conducted a literature review on the topic of the work using full-text and abstract databases. The main causes of electromagnetic compatibility (EMC) violations and ways to counteract these violations are considered. The main parameters of electricity quality, conditions for their measurement and permissible ranges according to the State Standards of Ukraine (SSU) are highlighted. A review of devices for measuring the parameters of electricity quality and the search for a suitable one that meets Ukrainian standards was carried out. **Findings.** The authors have proved: 1) the problem of measuring electricity quality parameters is relevant and important for its accurate accounting; 2) control of electricity quality parameters and compliance with state standards allows avoiding negative impact on the electricity supply system; 3) the use of modern digital measuring devices provides greater measurement accuracy than analog ones, and they are able to take into account more parameters in one measurement. **Originality.** The authors conducted a study in the field of electromagnetic compatibility in the field of electromagnetic compatibility using a digital device that gives more accurate and reliable results of power quality parameters. **Practical value.** Based on the results obtained, it is possible both to correct the personal research of individual scientists or teams of scientists and to predict further prospects for the development of the subject area «Electromagnetic Compatibility» in traction power supply systems in railway transport. The research can also be useful in the study of the disciplines «Electromagnetic Compatibility of Railway Automation Systems» and «Electrical Circuits and Lines of Railway Automation», organization of scientific and practical seminars, advanced training courses, etc.

Keywords: parameters of electric power quality; electromagnetic compatibility; devices; harmonics; voltage; current; power

REFERENCES

1. *Analizator parametriv yakosti elektrychnoi enerhii PQM-700UA z sertyfikatom S klas.* Retrieved from <https://sonel.ua/ua/p1567754-analizator-parametriv-yakosti.html> (in Ukrainian)
2. *Analizator parametriv yakosti elektroenerhii SATEC PMI75.* Retrieved from <https://www.satec-global.com.ua/analizatori-yakosti/pm175/> (in Ukrainian)

АВТОМАТИЗОВАНІ ТА ТЕЛЕМАТИЧНІ СИСТЕМИ НА ТРАНСПОРТІ

3. *Elektrychna enerhiia. Normy yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektrozhivlennia zahalnoho pryznachennia, 31 GOST 13109-97.* (1999). (in Ukrainian)
4. *Kharakterystyky napruhy elektropostachannia v elektrychnykh merezhakh zahalnoi pryznachnosti, 27 DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT).* (2014). (in Ukrainian)
5. *Zasoby vymiriuvannia elektrychnoi enerhii zminnoho strumu. Spetsialni vymohy. Chastyna 22. Lichnyky aktyvnoi enerhii statychni (klasiv tochnosti 0,2 S i 0,5 S) (EN 62053-22:2003, IDT), DSTU EN 62053-22:2015.* (2016). Retrieved from http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=74517 (in Ukrainian)
6. *Elektromahnitna sumisnist. Chastyna 4-30. Metody vyprobuvannia ta vymiriuvannia. Vymiriuvannia pokaznykiv yakosti elektrychnoi enerhii (IEC 61000-4-30:2008, IDT), DSTU IEC 61000-4-30:2010.* (2016). (in Ukrainian)
7. *Rules for the technical operation of consumer electrical installations (PTE).* Retrieved from <https://www.diagram.com.ua/list/44.shtml#pte> (in Ukrainian)
8. *Pro zatverdzhennia planu zakhodiv z realizatsii etapu «Reformuvannia enerhetychnoho sektoru (do 2020 roku)» Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2035 roku «Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist».* (2018). *Verkhovna Rada of Ukraine.* Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/497-2018-%D1%80#Text> (in Ukrainian)
9. Serdiuk, T. (2019). Elektromahnitna sumisnist i analiz parametriv yakosti elektrychnoi enerhii spozhyvachiv tiahovykh pidstantsii. *Electromagnetic compatibility and safety in railway transport, 17*, 48-60. (in Ukrainian)
10. Sychenko, V., Kosarev, E., Kuznetsov, V., Malyshev, S., Kordin, A., Danilov, A., Polyakh, O., & Kurochka, O. (2018). Quality of electric energy on tires of own needs of traction substations of electrified railways. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport, 16*, 57-61. (in Ukrainian)
11. *Normy yakosti elektrychnoi enerhii v mahistralnykh ta mizhderzhavnykh elektrychnykh merezhakh NEK Ukrenerho, SOU NEK 03.120.4-14:2021.* (2021). Retrieved from http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=94285 (in Ukrainian)
12. *Metodyka vymiriuvannia yakosti elektrychnoi enerhii v systemakh elektropostachannia zahalnoho pryznachennia, 98 COV-H EE40.1-37471933-55:2011.* (2012). (in Ukrainian)
13. Havryliuk, V. (2017). A review of power quality issues in electrified rails. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport, 14*, 11-20. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2017/137704> (in English)
14. Kumar, P. (2017). A Review of power Quality Problems, Standards and Solutions. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 04(01)*, 1765-1775. (in English)
15. *Siemens Sicam P855 7KG85 Series Device Manual.* Retrieved from <https://www.manualslib.com/manual/1581656/Siemens-Sicam-P855-7kg85-Series.html> (in English)
16. ten Have, B., Hartman, T., Moonen, N., Keyer, C., & Leferink, F. (2019). Faulty Readings of Static Energy Meters Caused by Conducted Electromagnetic Interference from a Water Pump. *Renewable Energy and Power Quality Journal, 17*, 15-19. DOI: <https://doi.org/10.24084/repqj17.205> (in English)
17. *WT5000 Precision Power Analyzer.* Retrieved from <https://tmi.yokogawa.com/solutions/products/power-analyzers/wt5000/> (in English)

Надійшла до редколегії: 26.05.2023

Прийнята до друку: 26.09.2023