

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИЛАДОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

О.С. Криницький, Б.Р. Рибчин

Івано-Франківський національний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ

Анотація

Проведено аналіз показників якості електричної енергії, які регламентовані європейськими і національними стандартами України. Досліджено фактори, які впливають на якість електричної енергії. Розглянуті прилади, які дозволяють апаратурно оцінювати якість електричної енергії та їх особливості конструктивного виконання.

Ключові слова: якість електричної енергії, засоби виміральної техніки, законодавче регулювання, стандарти з якості електричної енергії.

1. Вступ

Якість електроенергії стала важливою проблемою для енергетичних систем та електричних пристроїв. Дана проблема є досить актуальною на даний час, але, незважаючи на велику кількість публікацій, термін «якість електроенергії» так і не був остаточно визначений [1]. Однак майже всі автори визнають, що це важливий аспект систем живлення, який безпосередньо впливає на ефективність експлуатації електрообладнання, його безпеку та надійність. Різні автори використовують термін «якість електроенергії» з різним фізичним змістом, зокрема він використовується як синонім до надійності та якості постачання. Аналізуючи їхні праці, можна зробити висновок, що якість електроенергії, як правило, визначає якість напруги або струму та може бути визначена із вимірювання та аналізу напруги, синусоїдальності форми сигналу та частоти.

В [2] автори розділяють джерела генерування спотворень в мережі на три категорії: малі та передбачувані (наприклад, побутові споживачі, що генерують гармоніки), великі та випадкові (наприклад, споживачі, що створюють коливання напруги) та великі передбачувані (наприклад, високопотужні споживачі, такі як промислові підприємства).

Слід також зауважити, що за статистикою понад 60% проблем з якістю електроенергії спричинені природними та непередбачуваними подіями, наприклад, це поширення грозових перенапруг, геомагнітно індуковані струми пов'язані із сонячними спалахами [3].

Також є можливі джерела, які впливають на якість електроенергії, на етапі її генерування на електростанціях, на етапі розподілу і транспортування до кінцевого споживача. Серед них можна виділити на різних етапах такі причини зниження якості електричної енергії.

На етапі генерування. Незважаючи на те, що синхронні генератори генерують майже ідеальні синусоїдальні напруги (вміст гармонік складає менше 3%), існують проблеми, пов'язані з їхнім технічним обслуговуванням і іншими подіями, які призводять до вимушених відключень споживачів.

На етапі передачі. Під час передачі типовими проблемами є: стрибок напруги (за умов сильного вітру, що призводить до перебоїв у постачанні або випадкових коливань напруги), блискавка, що призводить до різких стрибків, пробій електричних ізоляторів, провали напруги через несправності, перехідні перенапруги, спричинені різкою зміною навантаження ємнісного або індуктивного характеру, неправильна робота пристроїв автоматичного регулювання напруги, що може призвести до тривалих коливань напруги.

На етапі розподілу. Типовими проблемами, які виникають у системах розподілу, є провали, стрибки та переривання напруги, перехідні перенапруги, неправильна робота пристроїв регулювання напруги.

Кінцевий споживач також може впливати на якість електричної енергії в сучасних енергосистемах. Деякі з них можуть бути такими: гармоніки, які створені нелінійними навантаженнями, такими як приводи з регульованою швидкістю, джерела безперебійного живлення, лазерні принтери, комп'ютери; коливання частоти, коли використовуються вторинні та резервні джерела живлення, такі як дизельні генератори; неправильне застосування технологій або правил прокладання електропроводки.

Метою роботи є вивчення параметрів і факторів, які впливають на якість електричної енергії та дослідження приладів для експериментального оцінювання якості електричної енергії.

2. Виклад основного матеріалу

При дослідженні якості електричної енергії виділяють «стаціонарні» та «нестационарні» явища. У деяких нормативних документах (наприклад, IEEE-519) використовують форму хвилі (тривалість і амплітуду) для класифікації проблем якості електроенергії.

Ще одним із факторів, який може впливати на якість електричної енергії є види перехідних процесів в енергосистемі, тобто небажані чи короткочасні події, які викликають спотворення в мережі. Їх характеристики та форми сигналів залежать від механізму утворення та параметрів мережі.

Перехідні процеси можна класифікувати за багатьма характерними компонентами, такими як амплітуда, тривалість, частота, фаза, форма сигналу.

літуда, тривалість, час наростання, амплітудна спектральна щільність і частота виникнення. Перехідні процеси зазвичай класифікують на дві категорії, імпульсні та коливальні [4].

Ще одним із факторів, що може впливати на якість електричної енергії є короткочасні коливання напруги. Згідно із стандартом IEEE-1159 виділяються наступні терміни: «провал напруги» та «коротке переривання». Переривання трапляється тоді, коли напруга живлення (або струм навантаження) зменшується до значення, яке є менше нижньої межі роботи протягом менше ніж 1 хвилини. Різниця між тривалою (або стійкою) перервою та перериванням є в тому, що в першому випадку подача відновлюється вручну, а під час другого – автоматично. Зазвичай, переривання вимірюється його тривалістю [5]. Наприклад, згідно з європейським стандартом EN-50160 існують такі його різновиди [6]: коротка перерва до 3 хвилин, тривала перерва, яка перевищує 3 хвилини.

На основі стандарту IEEE-1250 переривання класифікуються так: миттєве, яке становить від 0,5 до 30 циклів; короткочасне становить від 30 циклів до 2 секунд; тимчасова перерва становить від 2 секунд до 2 хвилин; тривала перерва триває більше 2 хвилин.

В Україні питання якості електричної енергії регулюються стандартами та нормативними актами. Наприклад, стандарт ДСТУ EN 50160 [6] визначає вимоги до якості електричної енергії в електричних мережах загального користування та встановлює допустимі межі для таких характеристик, як напруга та її коливання, часові коливання частоти, гармоніки, їхні рівні та інші параметри. Нормативний документ СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 [7] регулює питання якості електричної енергії в Україні. Він містить вимоги до електричних мереж, що забезпечують електричну енергію споживачам, а також критерії для контролю за якістю постачання електричної енергії. Стандарт ДСТУ ІЕС 61000 [8] відображає методи вимірювання, допустимі межі та вплив гармонік на якість електричної енергії.

Далі коротко розглянемо показники якості електричної енергії, які відображені як в Європейських, так і в Українських стандартах.

Провали (просідання) напруги. Просідання – це короткочасні зниження значень середньоквадратичної напруги. Немає чіткого визначення тривалості просідання, але зазвичай воно триває до 1 хвилини. Просідання напруги, зазвичай, виникає з таких причин:

- підключення потужних навантажень,
- одиночне замикання фаз на землю,
- перемикавання навантаження.

Кожен із цих випадків може викликати просідання з певною характеристикою за величиною та тривалістю. Для запобігання даних негативних явищ в основному використовуються джерела безперебійного живлення (ДБЖ) або стабілізатори напруги.

Перенапруга. Збільшення величини напруги на 110 - 180% від початкової (опорної напруги) називається перенапругою. Найбільш прийнятна тривалість перенапруги становить від 0,5 циклу до 1 хвилини [9]. Перенапруги зустрічаються не так часто, як просідання.

Як і у випадку просідання, ДБЖ або стабілізатори є типовими рішеннями для обмеження ефекту перенапруги.

Довготривалі зміни напруги. Відповідно до стандартів (IEEE-1159) відхилення середньоквадратичного значення напруги від номінального більше, ніж на 1 хвилину, називається довготривалою зміною напруги. Основними причинами тривалих коливань (змін напруги) є коливання навантаження та перемикавання системи. IEEE-1159 поділяє ці події на три категорії: тривале переривання, знижена напруга та перенапруга [5, 6].

Тривале переривання є найсерйознішою і найбільш тривалою подією, пов'язаною із якістю електроенергії, під час якої напруга падає до нуля і автоматично не повертається до номінального значення. Згідно із визначенням IEEE, тривалість такої перерви становить більше 3 хвилин. Кількість таких перерв є важливою характеристикою для вимірювання здатності енергосистеми надавати послуги споживачам.

Дисбаланс напруги. Якщо напруги трифазної системи не однакові за величиною або різниця фаз між ними не становить 120 градусів, виникає дисбаланс напруг [5]. Основними причинами дисбалансу напруги в енергосистемах є незбалансоване однофазне навантаження в трифазній системі.

Спотворення форми сигналу. Стаціонарне відхилення від синусоїди називається спотворенням форми сигналу. Існує п'ять основних типів спотворень сигналу: зміщення за допомогою постійного струму, гармоніки, інтергармоніки, спотворення напруги та електричний шум. Для теоретичного аналізу несинусоїдальної форми сигналу зазвичай використовується ряд Фур'є.

Зміщення за допомогою постійного струму. Наявність компонента постійного струму або напруги в системі змінного струму називається зміщенням за допомогою постійного струму. Основними причинами виникнення зміщення постійного струму в системах живлення є використання випрямлячів та інших електронних комутаційних пристроїв, а також геомагнітні збурення [7].

Основними шкідливими наслідками від наявності постійного струму в змінних мережах є:

- насичення осердя трансформатора;
- генерація парних гармонік;
- додаткове нагрівання трансформаторів, що призводить до зменшення їх терміну служби, двигунів змінного струму та електромагнітних пристроїв;
- електролітична ерозія заземлюючих електродів.

Гармоніки — це синусоїдальні напруги або струми з частотами, кратними основній частоті енергосистеми (зазвичай 50 або 60 Гц). Періодичні несинусоїдальні сигнали можуть бути піддані розкладу у ряд Фур'є та розкладені на суму основної складової та гармонік.

Основними негативними впливами гармонік є:

- підвищення похибок вимірювання контрольованими засобами;
- додаткові втрати в конденсаторах, трансформаторах і обертових машинах;
- додатковий шум від двигунів та іншого обладнання.

Рекомендованими рішеннями для зменшення та контролю гармонік є застосування пасивних, або активних, або гібридних фільтрів, або спеціальних пристроїв живлення [8].

Спотворення напруги. Періодичне зростання напруги, викликане мережевими комутаційними тиристорними схемами, називається спотворенням напруги. Воно виникає у формі хвилі лінійної напруги під час нормальної роботи силових електронних пристроїв, коли струм перемикається з однієї фази на іншу. Протягом цього періоду існує короткочасне замикання між двома комутуючими фазами, що знижує напругу в мережі, оскільки зниження напруги обмежується лише опором системи.

Спотворення напруги є періодичним явищем і може бути охарактеризоване його частотним спектром. Частота цього спектру є досить висока. Зазвичай неможливо виміряти його за допомогою обладнання, яке використовується для гармонічного аналізу. Спотворення напруги може створювати додаткове навантаження на ізоляцію трансформаторів, генераторів і чутливого вимірювального обладнання. Деякі стандарти (IEEE-519) встановлюють обмеження для тривалості спотворення напруги [4].

Електричні перешкоди. Електричні перешкоди визначаються як небажані електричні сигнали з широкосмуговим спектральним вмістом нижче 200 кГц [8], який накладається на напругу або струм системи живлення в фазних провідниках або нейтральних провідниках чи сигнальних лініях. Електричні перешкоди можуть виникати внаслідок неправильних з'єднань у системах передачі або розподілу, дугових печак, електропечак, силових електронних пристроїв, схемах керування, зварювальному обладнанні внаслідок неправильного заземлення приводів з регульованою швидкістю. Проблема можна пом'якшити за допомогою фільтрів або трансформаторів. Електричний шум впливає на електронні пристрої, такі як мікроконтролери та програмовані контролери.

Коливання напруги – це систематичні варіації напруги або випадкові її зміни, величина яких, зазвичай, не перевищує встановлених діапазонів напруги, котрі визначено у ДСТУ EN 50160 [6]. Коливання напруги поділяються на дві категорії:

- ступеневі зміни напруги, регулярні або нерегулярні в часі;
- циклічні або випадкові зміни напруги, викликані змінами навантаження.

Коливання напруги погіршують продуктивність роботи обладнання та спричиняють нестабільність внутрішніх напруг і струмів електричного обладнання. Однак коливання напруги менше 10% не впливає на електричне обладнання.

Флікер описується як «непервні та швидкі зміни величини струму навантаження, що викликають зміни напруги». Термін «флікер» походить від впливу коливань напруги на лампи таким чином, що людське око сприймає їх мерехтіння. Причиною появи флікера є зміна частоти живлення, тобто відхилення основної частоти енергосистеми від заданого номінального значення (наприклад, 50 або 60 Гц) [10]. Якщо ба-

ланс між генерацією та попитом (навантаженням) не підтримується, частота енергосистеми буде відхилятися через зміни швидкості обертання електромеханічних генераторів. Величина відхилення та її тривалість залежать від характеристик навантаження та реакції системи керування генерацією на зміни навантаження. Несправності системи передачі електроенергії також можуть спричинити коливання частоти.

3. Обладнання для вимірювання показників якості електроенергії

Незважаючи на те, що були розроблені інструменти, які вимірюють широкий спектр показників, пов'язаних із якістю, можна використовувати кілька різних інструментів залежно від досліджуваного явища. До основних категорій приладів, які можуть бути застосовані, належать: вимірювачі параметрів заземлення, мультиметри, осцилографи, аналізатори завад, аналізатори гармонік і аналізатори спектру, комбіновані аналізатори перешкод і гармонік, вимірювачі флікеру.

Осцилографи. Осцилограф є цінним під час виконання тестів у реальному часі. Перегляд форм сигналів напруги та струму може надати багато інформації про те, що відбувається, навіть без виконання детального гармонічного аналізу сигналів. Можна отримати величини напруг і струмів, шукати очевидні спотворення та виявити будь-які значні зміни в сигналах.

Аналізатори завад. Аналізатори завад утворюють категорію приладів, які були розроблені спеціально для вимірювання параметру, який характеризує якість електроенергії. Зазвичай, вони можуть вимірювати широкий спектр завад від дуже короткочасних до довготривалих. Можна встановити порогові значення та залишити прилад, щоб він фіксував порушення протягом певного періоду часу.

В основному існують дві категорії таких пристроїв.

1. Звичайні аналізатори, які підсумовують відхилення параметрів з конкретною інформацією, наприклад, такою як величини перенапруги та зниженої напруги, величина і тривалість просідання та стрибків напруги, величина і тривалість перехідних процесів тощо.

2. Графічні аналізатори, які зберігають і друкують фактичну форму сигналу разом із описовою інформацією. Часто важко визначити характеристики перехідного процесу на основі інформації, доступної з традиційних аналізаторів. Тому для детального аналізу проблеми з якістю електроенергії майже необхідно мати здатність фіксувати форму хвилі завади.

Аналізатори спектру та аналізатори гармонік. Існують, в основному, три категорії засобів для аналізу гармонік.

1. Прості вимірювачі для швидкої перевірки рівнів гармонік у проблемному місці.

2. Аналізатори спектру загального призначення, які застосовуються для аналізу спектру сигналів. Перевага цих засобів полягає в тому, що вони мають дуже потужні можливості для аналізу сигналів. Не-

доліком є те, що вони не розроблені спеціально для дискретизації хвилі промислової частоти і, отже, повинні використовуватися обережно, щоб забезпечити точний гармонічний аналіз.

3. Аналізатори гармонік спеціального призначення, які були розроблені спеціально для гармонічного аналізу в енергосистемах. Принцип їх роботи ґрунтується на швидкому перетворенні Фур'є з частотами дискретизації, спеціально розробленими для

визначення гармонічних компонентів у сигналах потужності

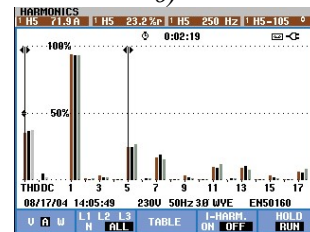
Відомим виробником засобів для вимірювання показників якості електричної енергії є компанія Fluke. Серед цих засобів можна виділити 430 серію, зокрема Fluke 435 (рис.1). Дана серія дозволяє у форматі реального часу відслідковувати стан і параметри трифазних мереж з високою точністю [11].



а)



б)



в)

а) зовнішній вигляд аналізатора, б) оглядовий екран системи моніторингу, в) екран відстеження гармонік.

Рисунок 1 – Аналізатор якості енергопостачання Fluke 435 [11]

Комбіновані аналізатори заводів і гармонік. Сучасні найновіші засоби поєднують функції дискретизації гармонік і моніторингу енергії з функціями повного моніторингу заводів. Вихідні дані базуються на графічному вигляді, які дистанційно збираються в центральну базу даних. Після цього можна виконати статистичний аналіз даних. Один із прикладів такого засобу від фірми Dranetz є Dranetz PowerVisa. Цей засіб призначений для використання як у промисловості, так і для конкретного споживача. Він одночасно контролює трифазні напруги та струми (плюс нейтралі), що дуже важливо для діагностики проблем з якістю електроенергії. Прилад збирає необроблені дані та зберігає їх у внутрішній пам'яті для віддаленого завантаження [12].

Вимірювачі флікери (мерехтіння). Протягом багатьох років було розроблено багато різних методів вимірювання мерехтіння. Ці методи варіюються від використання дуже простих середньоквадратичних вимірювачів із калібруванням за стандартними кривими мерехтіння до складних вимірювачів, які використовують точно налаштовані фільтри та статистичний аналіз для оцінки рівня мерехтіння напруги. Існують стандарти, які містять криві мерехтіння, котрі використовуються як орієнтири для оцінки серйозності флікери в електричній системі [10].

Швидке перетворення Фур'є є одним із методів, який використовується для вимірювання флікери і полягає у взятті необроблених зразків фактичних форм

сигналів напруги та здійснює перетворення Фур'є на демодульованому сигналі (тільки сигнал флікери), щоб виділити різні частоти в даних. Потім ці дані порівнюються з кривою флікери. Цей метод більш точніше кількісно визначає виміряні дані завдяки тому, що величина та частота мерехтіння відомі.

Серед відомих вимірювачів мерехтіння можна виділити ILT710 [13]. Він дозволяє проводити вимірювання різних параметрів мерехтіння і інтенсивності освітлення та виводити отримані дані на комп'ютер.

Сучасна практика моніторингу якості електроенергії містить таку послідовність операцій: збір даних, перетворення їх на корисну інформацію, поширення її серед користувачів. Всі ці процеси відбуваються в самому засобі. Таким чином, було розроблено нове покоління моніторів якості електроенергії з інтегрованими інтелектуальними системами, які відповідають сучасним вимогам. Цей тип засобів якості електроенергії є інтелектуальними моніторами якості електроенергії, де інформація створюється безпосередньо в засобі та одразу стає доступною для користувачів.

Прикладом можуть бути інтелектуальні монітори якості електроенергії які розробляють компанії Electrotek Concepts, Dranetz, Electric Power Research Institute (EPRI). Вони забезпечують аналіз даних на місці зі швидким розповсюдженням інформації за допомогою інтернет-технологій. Вони складаються з компонентів збору і оброблення даних, комунікації, веб-візуалізації та керування.

4. Висновки

Розглянуто параметри якості електричної енергії, серед яких найважливішими є напруга, гармоніки, дисбаланс фаз, флікер. Показано, що показники якості України є гармонізованими з показниками якості європейського союзу. Наведені конкретні приклади вимірювальних засобів, які дозволяють оцінити такі параметри якості електричної енергії, такі як аналіз гармонік, спектру і завад та оцінити флікер.

Виявлена тенденція приладного забезпечення оцінювання якості електричної енергії, яка стосу-

ється того, що виробники електроенергії поєднують моніторинг якості електроенергії з управлінням системами постачання енергії, оцінкою роботи захисних пристроїв і функціями автоматизації розподілу електроенергії із загальним доступом до всієї інформації.

З врахуванням значної вартості імпортованих приладів доцільним є розроблення на наукових засадах нових підходів до створення аналогічних засобів, які були би дешевшими при тих самих функціональних можливостях.

Список літератури

1. Gerald T. Heydt Electric power quality. The Electrical Engineering Handbook. Star in a Circle Publications 1991. P.805-810. DOI:10.1016/B978-012170960-0/50059-1
2. Arrillaga J, Watson NR, Chen S. Power system quality assessment. John Wiley & Sons. 2000. P.320.
3. Kennedy BW. Power quality primer. McGraw Hill, New York. 2000. P.360.
4. Standard IEEE 519. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems
5. Standard IEEE-1159 IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality
6. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT)
7. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго
8. ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012 (ІЕС 61000-4-7:2009, IDT) Електромагнітна сумісність. Частина 4-7. Методики випробування та вимірювання. Загальна настанова щодо вимірювання гармонік та інтергармонік від електропостачальних систем загальної призначеності й допоміжного устаткування
9. ДСТУ ІЕС 61000-4-30:2010 (ІЕС 61000-4-30:2008, IDT) Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії
10. ДСТУ EN 61000-4-15:2018 (EN 61000-4-15:2011, IDT; ІЕС 61000-4-15:2010, IDT) Електромагнітна сумісність. Частина 4-15. Методики випробування та вимірювання. Флікерметр. Технічні вимоги до функціонування та конструкції
11. Fluke 430 Series II Three-Phase Power Quality and Energy Analyzers Technical Data [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/Fluke-430-II-PQ-Analysers-Data-Sheet.PDF?jvpPx9LB3aVXQ4WeJmcUc5FXfjXq.ULW>
12. PowerVisa TM User's guide [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.dranetz.com/wp-content/uploads/2014/02/PowerVisa_UsersGuide_RevB.pdf
13. Flicker and Illuminance Meter Operation Manual [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://internationallight.com/sites/default/files/downloads/ilt710_flicker_manual_final.pdf?srsltid=AfmBOooaes-NYtQPHRU4KylqmqCyOMe0NKQ7leL7ZPylVm9OwnJQl2ko

Надійшла (Received) 15.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 29.10.2024

Відомості про авторів / About the authors

Криницький Олександр Степанович – к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний університет нафти і газу, e-mail: oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>

Krynytskyi Oleksandr – PhD, docent Associate Professor of the Department of Information and Digital Technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: oleksandr.krynytskyi@nung.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2338-8661>

Рибчин Богдан Романович – аспірант кафедри Інформаційно-вимірювальних технологій, Івано-Франківський національний університет нафти і газу, e-mail: rybchyn.b@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6616-2670>

Rybchyn Bohdan – graduate student Department of Information and Digital Technologies, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, e-mail: rybchyn.b@i.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6616-2670>

Research on instrumentation for electrical power quality assessment

Oleksandr Krynytskyi, Bohdan Rybchyn

Abstract

An analysis of the quality indicators of electric energy regulated by European and national standards of Ukraine has been carried out. Factors that affect the quality of electric energy have been studied. Devices that allow for instrumental assessment of the quality of electric energy and their design features have been considered.

Key words: quality of electric energy, measuring instruments, legislative regulation, standards for quality of electric energy