

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-76-34>

УДК 621.31

ГРИЦАК Роман

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0009-0005-7220-1690>

e-mail: roman.hrytsak-a15222@nung.edu.ua

ЯВОРСЬКИЙ Андрій

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

<https://orcid.org/0000-0002-5970-4286>

e-mail: andrii.yavorskyi@nung.edu.ua

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАКОНОДАВЧОГО РЕГУЛЮВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЙ ТА ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ У СФЕРІ ВИМІРЮВАННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Якість електричної енергії на даний час є доволі актуальним питанням, оскільки постійне зростання кількості нелінійних елементів та перехід на відновлювані джерела енергії спричиняють сильне її спотворення. З іншої сторони підтримання на високому рівні показників якості електричної енергії дозволяє суттєво підвищити рівень енергетичної ефективності та забезпечити стійку роботу мікропроцесорних приладів, до яких відноситься обчислювальна техніка. Але для забезпечення цього необхідним є розроблення та застосування високоякісних засобів вимірювальної техніки, які використовуватимуть точні методи вимірювання. Безпосередньо в даній публікації розглянуто законодавче регулювання у сфері якості електричної енергії як України так і Європейського союзу. Визначено залежність діючих стандартів між собою та наведено основні класифікації, за якими оцінюють засоби вимірювальної техніки. Базуючись на існуючих стандартах, що діють, проведено аналіз наявних наукових робіт, який вказав на проблеми із калібруванням та використанням ЗВТ в умовах постійної зміни вимог до показників якості електричної енергії. При цьому відмічена необхідність розроблення методів визначення впливу відновлюваних джерел енергії, серед яких є і фотоелектричні системи, на якість електричної енергії. Вперше здійснено огляд наявних засобів вимірювальної техніки, які призначені для визначення показників якості електричної енергії. За результатами якого сформовано структуровану таблицю, де порівняно 10 найпоширеніших засобів вимірювальної техніки за понад 10-ма показниками. Серед яких частина, що відповідає за відповідність вимогам стандартів та частина, яка дозволяє порівняти продуктивність і наявність важливого додаткового функціоналу. Проведений огляд також дозволив сформулювати ряд питань, відповідь на які дозволить значно спростити процес вибору засобів вимірювальної техніки та дозволить зменшити витрати. Зокрема відповідно до визначених питань було обрано кращі аналізатори якості електричної енергії для дослідження впливу фотоелектричних систем на усталені показники якості електричної енергії.

Ключові слова: якість електричної енергії, засоби вимірювальної техніки, законодавче регулювання, фотоелектричні системи, методи вимірювання ПЯЕ, аналізатори якості електричної енергії, ДСТУ

HRYTSAK Roman, YAVORSKYI Andrii

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

REVIEW OF THE CURRENT STATE OF LEGISLATIVE REGULATION, TECHNOLOGIES AND MEASURING EQUIPMENT IN THE FIELD OF ELECTRICITY QUALITY MEASUREMENT

The quality of electricity is currently a rather urgent issue, as the constant growth in the number of nonlinear elements and the transition to renewable energy sources cause its strong distortion. On the other hand, maintaining a high level of power quality can significantly increase the level of energy efficiency and ensure the stable operation of microprocessor-based devices, including computing equipment. But to ensure this, it is necessary to develop and apply high-quality measuring instruments that use accurate measurement methods. This publication deals specifically with the legislative regulation in the field of electricity quality in both Ukraine and the European Union. The dependence of the existing standards on each other is determined and the main classifications by which measuring instruments are evaluated are presented. Based on the existing standards, the author analyzes the existing scientific works, which pointed to problems with the calibration and use of measuring instruments in the context of constantly changing requirements for electricity quality indicators. At the same time, the need to develop methods for determining the impact of renewable energy sources, including photovoltaic systems, on the quality of electricity is noted. For the first time, a review of existing measuring instruments designed to determine the quality of electricity was carried out. Based on the results of this review, a structured table was formed comparing the 10 most common measuring instruments for more than 10 indicators. Among them, there is a part responsible for compliance with the requirements of standards and a part that allows comparing performance and the availability of important additional functionality. The review also allowed us to formulate a number of questions, the answer to which will significantly simplify the process of selecting measuring instruments and reduce costs. In particular, in accordance with the identified issues, the best power quality analyzers were selected to study the impact of photovoltaic systems on the established indicators of power quality.

Keywords: electricity quality, measuring equipment, legislative regulation, photovoltaic systems, methods for measuring the quality of electricity, electricity quality analyzers, DSTU

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Ще декілька десятків років тому мало хто задумувався над якістю електричної енергії, яка подається через мережі загального користування. На той момент розвиток сучасних технологій був у зародковому стані, а основними споживачами генерованої електроенергії були переважно лінійні елементи, такі як лампи розжарювання, електричні тенти, тощо. Ці прилади вважаються лінійними, що свідчить про наявність у них лише активного опору із малим відсотком індуктивних та ємнісних частин. Тому параметри якості електроенергії суттєво коливались лише при одночасному вимкненні великих споживачів чи джерел живлення. Однак сьогодні у зв'язку із швидким розвитком сучасних технологій джерела спотворення якості електроенергії змінились. Так, напівпровідникові елементи, які є нелінійними, тобто ж у яких переважають саме індуктивні та ємнісні опори, стали основними джерелами спотворень.

Варто відмітити, що такі нелінійні елементи вводяться в мережу не лише зі сторони споживачів, але й зі сторони генерації енергії. Яскравим прикладом цього є технології відновлюваної енергетики. Як відомо, більшість відновлювальних технологій базуються на генерації постійного струму, який без перетворення у змінний не можна подавати в об'єднану енергетичну мережу. Для таких перетворень використовують силову напівпровідникову техніку, яка включає велику кількість транзисторів, тиристорів, індуктивних котушок та конденсаторів. Саме ці елементи наразі здатні спричинити великі спотворення показників якості електроенергії (ПЯЕ).

Однак для точного визначення рівня цих спотворень електроенергії необхідним є розроблення засобів вимірювальної техніки (ЗВТ), що здатні не тільки вимірювати всі параметри, але і виокремлювати їх по джерелах. При цьому до таких ЗВТ виносяться досить жорсткі вимоги як зі сторони точності і правильності вимірювання так і в напрямку електробезпеки та електричної сумісності. Але виробників стандартних аналізаторів якості електричної енергії є велика кількість, хоч більшість із них не в змозі забезпечити відповідність всім наявним вимогам. Це в свою чергу призводить до проблеми вибору, яка постає у покупців, оскільки кожна із моделей має свої переваги та недоліки. А додатковою перешкодою, є розгалуженість та запутаність стандартів, посилання на які переважно вказують у технічних специфікаціях до ЗВТ. Тому на сьогодні поширеність аналізаторів якості електроенергії є обмежена. А виробників, яким вдалось привести у відповідність всім вимогами свої моделі досить мало.

Таким чином основними користувачами аналізаторів є оператори систем розподілу (ОСР), які згідно своїх зобов'язань повинні підтримувати якість електроенергії на відповідному рівні. Однак у працівників цих компаній часто виникає необхідність у відокремленні ПЯЕ окремих джерел живлення, таких як приватна фотоелектрична станція (ФЕС) чи вітроелектростанція (ВЕС), оскільки ці джерела можуть як самі генерувати спотворення так і посилювати наявні. А згідно попереднього аналізу впливу зовнішніх факторів на роботу ФЕС [1] зроблено висновки, про суттєву залежність ПЯЕ ФЕС від зовнішніх здебільшого природних факторів. Що при переході на розосереджену генерацію та MicroGrid технології в яких якість електричної енергії є надзвичайно важливою буде мати згідно [2] ключове значення.

Відповідно при виявленні факту значної генерації спотворення від ФЕС ОСР для захисту своїх мереж та споживачів доцільним буде провести корегування ПЯЕ мережі як запропоновано у [2], а в крайніх випадках відключити це джерело генерації. Проте наразі можливостей підтвердити такі спотворення немає. Тому актуальною задачею перед науковцями та виробниками аналізаторів якості електроенергії є створення методів та ЗВТ, що дозволять визначати вплив окремих джерел на усталені в мережі ПЯЕ, а також провести порівняльний аналіз існуючих.

Аналіз діючих державних та міжнародних стандартів що визначають вимоги до ПЯЕ та методи їх вимірювання

Вивчаючи законодавство, яке діє у сфері якості електричної енергії потрібно враховувати нюанси та події, які вплинули на формування саме такої структури. Історично склалось, що у світі немає єдиних вимог до параметрів електричної мережі. Яскравим прикладом цього є відмінність у величині номінальної напруги розподільчих мереж. У більшості країн Європи та деяких інших країнах номінальна напруга рівна 230 В, а от Сполучні Штати Америки, які вважаються винахідниками цього виду енергії за основу беруть напругу 110 В. Таким чином всі енергетичні мережі можна розділити на декілька типів, у яких і будуть свої стандарти.

З іншої сторони оскільки вимоги до електричних мереж, зокрема і в плані якості встановлює кожна країна окремо, то їхня відмінність із часом стала ще більшою. Тому у світі існує велика кількість діючих стандартів, що визначають всі вимоги до функціонування електромереж. Так у деяких країнах вони досить прості, що зумовлено перш за все рівнем розвитку технологій та забезпеченості. А у інших досить жорсткі і постійно оновлюються. Відповідно розглядати всі наявні стандарти не раціонально, а доцільнішим буде порівнювати стандарти окремих країн.

Україна в цьому плані для розгляду є доволі цікавою, оскільки довгий час її мережі були синхронізовані із країнами, що входили до складу радянського союзу, де діяли міжнародні гості. Зокрема і

ГОСТу 13109-97 «Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення» [3], в якому об'єднана енергетична мережа відповідала аж до 2014 року. Однак із зміною вектору руху в напрямку Європейського Союзу (ЄС), де не діє даний нормативний документ необхідним постало питання поступової інтеграції із європейськими електричними мережами, що мають спільну назву ENTSO-E. Таким чином одним з перших кроків була ратифікація та прийняття в якості державного стандарту EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності» (EN 50160:2010, IDT) [4]. Та після переходу на зовсім новий стандарт не було здійснено припинення дії попереднього, що призвело до виникнення ряду розбіжностей. З однієї сторони НКРЕКП [5] вказує на необхідність використання європейського стандарту, а з іншого боку ОСР може прописувати у договорах із споживачем (за умови попереднього узгодження) посилання на вимоги ГОСТу. З цієї теми в низці наукових робіт [6,7] відмічають ряд розбіжностей між двома стандартами. Однією із яких є введення поняття «заявлена напруга», яка фактично може відрізнитись від загальноприйнятої.

Паралельно із переходом на основний стандарт, що визначає ПЯЕ також існують і проходять ратифікацію стандарти для визначення вимог до самих ЗВТ, які аналізуватимуть ці показники. Це необхідно, оскільки у ДСТУ [4] не вказані методи визначення цих показників та межі похибок. Так, для виробників аналізаторів якості затвердили стандарт ДСТУ EN 61000-4-30:2022 «Електромагнітна сумісність (ЕМС)». Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT) [8]. В ньому вказуються саме вимоги до ЗВТ. А враховуючи, що якість електроенергії є комплексним значенням, в яке входить велика кількість величин, то також вказані і методи їхнього визначення.

При цьому базовими для подальшого визначення всіх інших параметрів є значення напруги та струму. Їх визначають як середньоквадратичне значення на різних інтервалах часу. Основними приймаються інтервали у 10/12 періодів, 150/180 періодів, 1 с, 10 с, 30 хв., 1 год. та 2 год.. Варто відмітити, що в більшості ЗВТ визначення відбувається одразу за декількома періодами.

Також стандартом визначаються 3 основні класи ЗВТ, які мають певне призначення, що відповідає їхній точності. Найкращим серед них є клас А, який забезпечує найвищу точність і дозволяє використовувати ЗВТ у спірних питаннях, що виникають в процесі постачання електроенергії між постачальником та покупцем. Наступним за точністю є клас S, який призначений для статистичного обліку, проведення досліджень та інших аналогічних завдань.

ДСТУ [4] також визначається і третій рівень точності- клас В. До ЗВТ такого класу, ставляться доволі низькі вимоги, що в результаті не дозволяє використовувати їх для будь-яких із перелічених вище цілей. Загалом планується, що з часом цей клас віднімуть для аналізаторів якості електроенергії. Основною відмінністю класу В від двох інших є те, що методи вимірювань, похибки та діапазони вимірювань для більшості параметрів визначає сам виробник. ЗВТ такого класу можуть використовуватись у внутрішніх мережах та аналізу роботи окремих приладів чи частин мережі. До прикладу ЗВТ класу В активно використовують для обстеження виробничого обладнання промислових підприємств, оскільки у них є додаткові функції для такого аналізу.

Варто відмітити, що вимоги до вимірювань деяких параметрів визначаються й іншими стандартами. В число таких показників відноситься флікер, вимоги до визначення якого описані у цьому стандарті [9] і гармоніки та інтергармоніки, які визначаються згідно [10]. Останнім із них є поділ ЗВТ, який здійснюється у два класи (клас 1 та 2). Щоб відповідати класу 1 дозволяється мати максимальну похибку $\pm 5\%$ вимірюваного значення, якщо виміряне значення дорівнює або перевищує 1% від діапазону номінальної напруги ЗВТ та максимальна похибка $\pm 0,05\%$ від номінальної напруги діапазону ЗВТ, якщо значення менше ніж 1% діапазону номінальної напруги. Для другого класу встановлено замість 1% від діапазону номінальної напруги 3% та у випадку коли реальне значення нижче цього порогу похибку вимірювань $\pm 0,15\%$.

Додатково, на виробника покладаються зобов'язання відповідати стандарту [11], якщо аналізатор має клас А чи S. У ньому прописані вимоги до продукції та продуктивності ЗВТ, функції яких включають вимірювання, запис і, можливо, моніторинг параметрів якості електроенергії в системах електропостачання. Також у зв'язку із розвитком мереж та нормативних документів, в грудні 2023 року було замінено ДСТУ EN 50160:2014 [4] на оновлену версію ДСТУ EN 50160:2023 [12], в якій було уточнено низку визначень, при цьому суттєвих змін показників якості не відбулося.

Таким чином потрібно визнати, що законодавче регулювання в цій сфері є досить ґрунтовним, та стандартизованим. Це в свою чергу пояснюється великою відповідальністю, яка покладається на аналізатори якості оскільки вони призначені в тому числі і для вирішення спірних питань, що виникають між ОСР та споживачами.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: огляд існуючих засобів вимірювальної техніки у сфері аналізу якості електричної енергії, щодо їхньої відповідності діючим стандартам та можливості використання у дослідженнях фотоелектричних систем.

Виклад основного матеріалу

В рамках досить жорстких вимог, що виставлені законодавчо до аналізаторів якості електроенергії на даний час ведуться дослідження та розробки одразу у декількох напрямках. За одним напрямом фахівці та науковці намагаються покращити швидкість роботи, точність вимірювань та додати нові функції, так як це висвітлено у роботах [13-20]. Серед них є варіанти досить недорогих аналізаторів, для яких використовують потужності існуючого обладнання [13,15,19]. Також показані варіанти, як можна реалізувати вимірювання ПЯЕ за допомогою лічильників електроенергії.

Проте з іншої сторони науковці зосередили роботу в напрямку спрощення процедур калібрування та повірки, які для всіх ЗВТ є обов'язкові. Складність проведення таких процедур перш за все зумовлена великою кількістю вимірюваних величин в порівнянні із простим лічильником електроенергії чи вольтметром, де така величина одна або декілька. Наразі для цих цілей розроблені і окремі ЗВТ, що дозволяють створювати визначені тестами параметри мережі для перевірки аналізаторів. Але основна проблема полягає у тому, що ці процедури є тривалими та потребують фізичної передачі ЗВТ на дослідження. Але одним із рішень цього питання є описані дослідження [21-22], в яких розглядаються можливості дистанційного калібрування за допомогою телекомунікаційних мереж. Відповідно фахівці та науковці для спрощення своїх досліджень та поділі всіх існуючих аналізаторів вводять різноманітні класифікації по типу, будові, тощо.

Згідно першої розділяють ЗВТ на онлайн-лічильники, які надають інформацію без будь-якої реєстрації, реєстратори даних, які забезпечують періодичний запис даних, аналізатори якості електроенергії з вибірковими даними на основі подій та аналізатори якості електроенергії з безперервною реєстрацією всіх необроблених даних. Ця класифікація допомагає зрозуміти основне призначення моделі ЗВТ. Додатково за нею можна одразу зрозуміти, який основний функціонал у моделі. Відмічають, що найбільший попит саме на прилади якості електроенергії з безперервною реєстрацією всіх необроблених даних і додатковою фіксацією подій. Це зумовлено перш за все встановленими стандартами і вимогами до ЗВТ.

В свою чергу аналізатори якості електроенергії з безперервним записом даних поділяють на 2 види: портативні та стаціонарні. До портативних аналізаторів відносять ЗВТ, які мають можливість легкого транспортування та дозволяють в короткий час визначити ПЯЕ на будь-якій ділянці електричної мережі. Натомість стаціонарні аналізатори використовуються в основному для локального постійного вимірювання ПЯЕ. Такий тип аналізаторів є ідеальним у випадках коли клієнт чи ОСР має бажання відслідковувати якість переданої електроенергії.

Портативні аналізатори якості електроенергії

Варто відмітити, що на практиці ці ЗВТ використовують найчастіше, оскільки якість електроенергії перевіряють в основному при отриманні скарг від споживачів. І в таких випадках в процесі перевірки ПЯЕ ОСР є не доцільним встановлювати стаціонарну установку, бо згідно ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [8] визначення ПЯЕ триває до 1 тижня і лише в окремих випадках протягом 1 року.

Комплектація аналізаторів є доволі великою. У більшості випадків вона включає: однофазні струмовимірювальні кліщі, комплект затискачів, вимірювальний провід, карту пам'яті, кабелі передачі даних та трансформатори струму і напруги. А сам процес вимірювання відбувається за наступним порядком. Сигнал формується у струмовимірювальних кліщах і затискачах та передається або одразу на аналізатор якості, або через трансформатори струму і напруги. Після цього аналізатор проводить дискредитацію поданого сигналу та записує інтервальні значення струму та напруги, які є основою для подальшого аналізу ПЯЕ. Приклад комплектації наведено на рисунку 1. Потрібно розуміти, що від повноти комплектації напряму залежатиме вартість, яка для портативних ЗВТ коливається від 50 до 300 тисяч гривень.

Вже довгий час світовим лідером із виробництва ЗВТ, зокрема і в напрямку аналізаторів якості електроенергії є компанія Fluke. Ця компанія виробляє аналізатори у великому діапазоні, але основною їхньою серією є Fluke 430 series II [23]. (рисунок 1)

У моделях Fluke 434, 435 і 437 Series II реалізовано можливість визначати всі параметри згідно [12], параметри потужності, у яку входить активна, реактивна, повна енергії та коефіцієнти потужності. Також ЗВТ цієї серії дозволяють точно визначати втрати енергії. Для цього компанією був реалізований запатентований Fluke алгоритм втрат енергії, Unified Power Measurement, який вимірює та кількісно визначає втрати енергії через проблеми з гармоніками та дисбалансом, дозволяючи користувачеві точно визначити джерело втрати енергії в системі. Щодо відповідності діючому стандарту, то моделі Fluke 43-B (однофазний) та Fluke 434-II мають клас S. А ЗВТ Fluke 435-II, Fluke 437-II та Fluke 438-II відповідають класу A.



Рис. 1. Аналізатор якості електроенергії Fluke 435

Перевагами таких ЗВТ Fluke є те, що вони дозволяють в реальному часі отримувати інформацію про стан мережі та одразу приймати рішення, щодо технічного обслуговування обладнання чи мережі, дискредитація даних рівна 5000 в проміжку 10/12 періодів, яка є середньою поміж аналогів. Відмічається у цих аналізаторів і найвищий рівень безпеки в галузі 600 В CAT IV/1000 В CAT III.

До недоліків ЗВТ від компанії Fluke варто віднести перш за все високу вартість, яка звісно обґрунтована великим діапазоном вимірювань, однак для більшості користувачів вони не знадобляться.

В певній мірі кращим в плані вартості є аналізатор якості електроенергії MI 2892 Power Master [24] від компанії Metrel. При цьому незважаючи на нижчу вартість він дозволяє виконати аналогічну кількість вимірів та забезпечити високий рівень точності, що відповідає класу А (рисунок 2).



Рис. 2. Аналізатор якості електроенергії MI 2885 Master

Принцип дії аналізатора MI 2885 Master є аналогічним до більшості інших ЗВТ класу А і ґрунтується на вимірюванні значень напруги із частотою 7000 значень за секунду, з яких в подальшому вираховуються середньоквадратичні значення напруги за 10/12 періодів, 1 с., 1 хв., 30 хв, 1 год., 2 год. При цьому, враховуючи невелику частоту дискредитації аналізатора, дозволяє із високою точністю обчислювати гармонічний склад напруги, який є одним із основних при аналізі ПЯЕ.

До переваг аналізатора від компанії Metrel варто віднести можливість вимірювати температуру навколишнього середовища, яка може суттєво впливати на ПЯЕ, особливо при аналізі мереж із великою кількістю нелінійних елементів. Також за допомогою цього ЗВТ можна визначати ефективність роботи фотоелектричних інверторів. Тому його відносять до більш вузькоспеціалізованих аналізаторів.

Недоліком моделі аналізатора MI 2885 Master виступає досить малий дисплей та обмежена кількість параметрів, що виводяться на нього. Під час роботи із фотоелектричними інверторами необхідність використання додаткових дисплеїв чи комп'ютерів стає проблемою, оскільки площі ФЕС є значними.

Технологічне рішення представив і виробник MAVOWATT. Зважаючи, що самостійно вибирати методи обчислення ПЯЕ виробникам для класу А неможна, то у моделях своїх аналізаторів якості MAVOWATT 230, 240, 270 & 270-400 [25] фахівці додали важливу функцію дистанційного контролю. Принцип роботи полягає у тому, що вимірювання і обробка сигналів здійснюється як і в інших ЗВТ за допомогою вбудованих процесорів, проте у користувача є додаткова можливість отримувати оброблені дані та керувати самим аналізатором дистанційно. Дистанційний доступ у MAVOWATT 230 та інших реалізується за допомогою мережі Ethernet, Wireless та Bluetooth® PAN. При цьому дані про стан захищені за допомогою протоколу VNC, який є стандартом обчислювальної галузі для безпечного, захищеного паролем дистанційного керування. Вартими уваги і реалізовані варіанти синхронізації реального часу, які для аналізаторів є важливі з точки зору правильного проведення вимірювань. Так у MAVOWATT 230 реалізовано три методи синхронізації часу. В свою чергу система самостійно використовуватиме найкраще доступне джерело часу, якими можуть бути: GPS із використанням зовнішнього приймача, GPS для синхронізації часу з точністю до 1 мс, синхронізація часу за мережевим протоколом часу (NTP) через Ethernet або бездротове з'єднання для синхронізації часу з точністю до 10 мс і внутрішній годинник. (рисунок 3)



Рис. 3. Аналізатор якості електроенергії MAVOWATT 230

Перевагами цього аналізатора є його унікальна можливість дистанційного керування ЗВТ, включаючи можливість аналізу параметрів при будь-якій погоді.

Активно набувають популярності і аналізатори якості електроенергії від польської компанії SONEL S.A., зокрема модель PQM-700UA [26]. Згідно проведених перевірок на відповідність стандарту, дана модель віднесена до ЗВТ класу S. Тобто їх можна використовувати для статистичних, дослідницьких та аналітичних цілей. Проте інші версії даного приладу, такі як PQM-702UA, PQM-703UA відповідають класу А та використовуються для перевірки скарг від споживачів електроенергії. (рисунок 4)



Рис. 4. Аналізатор якості електроенергії SONEL S.A PQM-700UA

Особливістю PQM-700UA є його направленість на дослідження саме розподільчих мереж. Враховуючи, що розглянуті вище ЗВТ лише включали в себе можливість вимірювання ПЯЕ у розподільчих мережах, але були більше призначені для дослідження промислових об'єктів, то цей портативний аналізатор займається лише аналізом ПЯЕ загальної низьковольтної мережі. З цією метою розробники передбачили можливість дистанційного передавання інформації та підключення безпосередньо до ліній електромереж. А вбудований акумулятор дозволяє продовжити вимірювання навіть за відсутності основного живлення від мережі.

Одним із недоліків аналізатора від компанії SONEL S.A є необхідність додаткового пристрою відображення. Оскільки у версіях ЗВТ може бути відсутній дисплей, або робота із ним може бути ускладнена через некомфортне місце підключення.

Для менш точних вимірювань ПЯЕ, що не по всіх показниках відповідатимуть вимогам ДСТУ EN 61000-4-30:2022 та ДСТУ EN 50160:2023 наявні ЗВТ Chauvin Arnoux CA 8336 та HT Italia HT-PQA 823 [27-28]. Ці аналізатори якості мають великий функціонал вимірювань, які націлені на обстеження технологічно обладнання. Тому для них важливим є не відповідність вказаним вище стандартам, а можливість високої дискредитації даних, яка необхідна для фіксації пускових струмів та перехідних процесів. (рисунок 5)



Рис. 5. Аналізатори якості електроенергії Chauvin Arnoux CA 8336 та HT Italia HT-PQA 823

Їхніми перевагами є дещо нижча вартість в порівнянні із аналізаторами класу А. При цьому вони здійснюють доволі точні вимірювання тих же ПЯЕ. Також для даних ЗВТ випущена велика кількість струмових кліщів, які дозволяють визначати значення струму у великому діапазоні, зокрема такі моделі як: MN93, MA193-250, MA196-350, PAC93, A196-610, C193, E3N та інші.

Недоліком як вже було вище описано звісно є невідповідність класу А. Також до мінусів варто віднести відсутність дистанційної передачі даних та дистанційного керування, що спрощує роботу

користувача. У Chauvin Arnoux SA 8336 наявна можливість лише передавати інформацію за допомогою роз'єму USB.

Стационарні аналізатори якості електроенергії

Стационарні аналізатори якості електроенергії відрізняються від портативних в основному лише корпусом. При цьому здатні виконувати аналогічні розрахунки тривалий час. Їхнім призначенням є постійний моніторинг ПЯЕ та передача результатів вимірювань на загальні центри моніторингу. Тому їх в більшості випадків використовують приватні компанії та споживачі з метою перевірки належної якості отриманої електроенергії та з метою постійного відслідковування рівня якості у всіх мережах також використовують і ОСР. Таким чином більшість розроблених ЗВТ відповідають класу А за точністю, що є високою відміткою. Основними виробниками є компанії Schneider Electric, A-eberle, Powerside та Janitze.

У комплект таких приладів, переважно не входять додаткові засоби такі як струмовимірювальні кліщі, вимірювальні кабеля та затискачі. Оскільки дані компоненти вже вбудовані у прилад, який кріпиться на DIN-рейку. Вартість стационарних аналізаторів нижча і варіюється від 20 до 100 тисяч гривень.

Так аналізатор від компанії Schneider Electric ION7650 [29] забезпечує вимірювання симетричних компонентів, швидке виявлення перехідних процесів, захоплення форми сигналу при 1024 вибірках/цикл і моніторинг відповідності якості електроенергії (рисунк 6). Конструкцією такої моделі передбачено наявність великого дисплею для відображення основних показників, що серед таких конструкцій ЗВТ є доволі рідкісним. Відповідно він є хорошим рішенням для першої групи покупців, а саме споживачів.

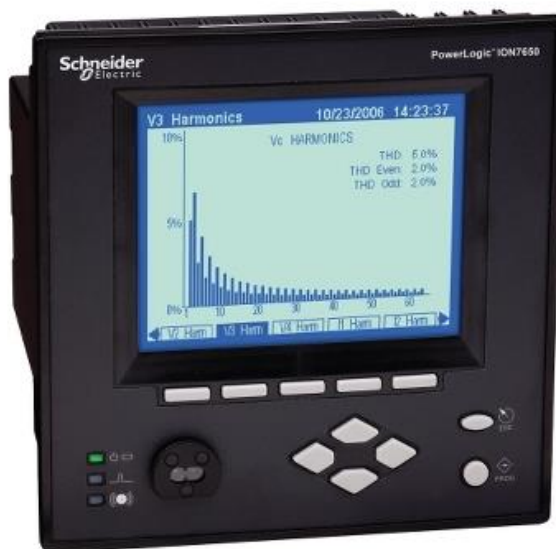


Рис. 6. Стационарний аналізатор якості електроенергії Schneider Electric ION7650

Перевагами цього аналізатора є одна з найвищих дискредитацій аналогового сигналу, що дозволяє реалізувати якісне захоплення форми сигналу. Як результат прилад вхоплює перехідні процеси від 20 мкс при 50 Гц та вимірює до 63-ї гармоніки. Також реалізовано навчання встановленого значення, щоб автоматично дізнаватися, що таке просідання та перевищення напруги, перехідний процес, або високе та низьке задане значення напруги.

До негативної сторони належать: великі розміри, націленість на мережі високої та низької напруги при цьому відсутність можливості використання інших струмових кліщів і трансформаторів напруги та струму.

Схожим рішенням в компанії A-eberle в плані аналізу, моніторингу та реєстрації показників якості електроенергії став їхній PQI-DA SMART [30]. Він підходить для моніторингу, реєстрації, оцінки та запису спеціальних контрольних величин згідно до угод про якість електроенергії між постачальником енергії та кінцевим споживачем. Крім того, пристрій може надавати багато вимірюваних значень паралельно для програм SCADA через стандартизовані інтерфейси, такі як Modbus. PQI-DA smart, який був розроблений для вимірювань, що виконуються в громадських мережах, а також для запису даних у промисловому середовищі з лінійною напругою вимірювання до 690 В. Його ключові характеристики, які роблять його придатним для таких середовищ, це: відсутність рухомих частин (вентиляторів, жорстких дисків тощо), рівень електробезпеки CAT IV, розширені можливості зберігання (користувач може розширити до 32 ГБ - це дозволяє записувати кілька років без підключення до бази даних). Додатково згідно стандарту IEC61000-4-7 має рівень В1 та здатний вимірювати частоти напруги та струму в діапазоні від 2 кГц до 9 кГц. (рисунок 7).

Перевагами цього стаціонарного аналізатора є кольоровий дисплей 1,7 дюйма, 1 ГБ внутрішньої пам'яті, смуга пропускання вхідного каналу 20 кГц, 4 входи для напруги і струму із точністю < 0,1% по напрузі та 1А/5А номінальний і 500А максимальний струм протягом 1 с по струму. Частота дискретизації осцилографічного реєстратора напруги та струму: 40,96 кГц / 10,24 кГц. Можливість онлайн-трансляції напруг і струмів із частотою дискретизації 40,96 кГц. Конструкцією приладу передбачено встановлення його на DIN-рейку.

Недоліком цього ЗВТ є значні габарити, обмежені можливості відображення інформації на вбудованому дисплеї.

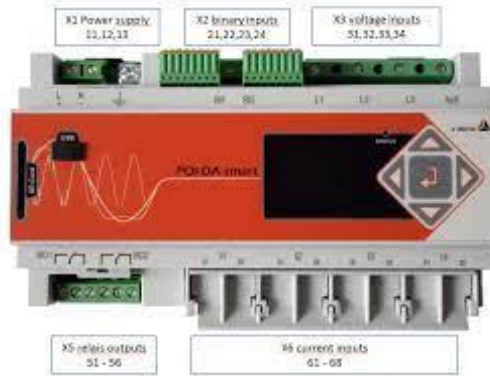


Рис. 6. Стаціонарний аналізатор якості електроенергії A-berle PQI-DA SMART

Зменшити розміри аналізаторів вдалось фахівцям компанії Powerside у моделі PQube 3 [31]. В даній моделі реалізовано ще більше можливостей. Зокрема алгоритм ЗВТ визначає окрім електричних параметрів також і екологічні. Це дозволяє власникам значною мірою економити кошти. При цьому враховуючи, що аналізатор отримує дані про параметри зовнішнього середовища такі як температуру, вологість, то в подальшому на базі аналізатора можливим є реалізація методів вимірювання ПЯЕ від ФЕС та виокремлення впливу саме генеруючої установки на усталені значення ПЯЕ (рисунок 7).



Рис. 7. Стаціонарний аналізатор якості електроенергії Powerside PQube 3

Перевагами цього ЗВТ є сенсорний дисплей, можливість перегляду за допомогою додатка понад 600 лічильників у реальному часі, останніх подій і стану системи, внутрішня пам'ять 32 ГБ для зберігання даних понад рік, реалізація підключення датчика ENV2 на стороні Powerside для визначення температури навколишнього середовища, вологості, барометричного тиску, ударів і вібрації, 3-осьового прискорення тощо. Також наявні бездротовий та стільниковий модеми, які передають дані на інші прилади та миттєве сповіщення про виникнення події. Запис даних здійснюється з частотою до 4 МГц, а виявлення та запис перехідних процесів тривалістю 250 нс.

Після вивчення наданих виробниками матеріалів та необхідності провести ґрунтовне їхнє порівняння було сформовано порівняльну таблицю відповідності ЗВТ основним вимогам викладеним у стандарті ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [8] та наявності основних додаткових функцій. При цьому до порівняння було взято понад 10 показників та розглянуто 10 найпопулярніших аналізаторів. При

ознайомленні із нею варто розуміти, що ЗВТ, які є частиною однієї серії, тобто у виробника є декілька моделей, фактично відображають рівень всієї серії.

Таблиця 1

Відповідність аналізаторів якості електроенергії вимогам викладеним у стандартах та наявності додаткових функцій

Параметр	Fluke 43-B	SONEL S.A. PQM-700UA	Metrel MI 2885 Master Q4	Metrel MI 2892 Power Master	Mavowatt 230	Fluke 435-II	A-eberle PQI-DA	Janitze UMG 512-PRO	Schneider Electric ION7650	Powerside PQube 3
	Рівень відповідності/ вимірювальні величини									
Тип	Портативні					Стационарні				
Частота	S	S	S	A	A	A	A	A	A	A
Напруга	B	S	S	A	A	A	A	A	A	A
Провали та перенапруги	-	S	A	A	A	A	A	A	A	A
Переривання	-	S	A	A	A	A	A	A	A	A
Небаланс	-	S	S	A	A	A	A	A	A	A
Флікер	-	S	F3	F3	F3	F3	F2	F3	F1	F3
Гармоніки	II/III	I			I/III					I
Інтергармоніки	-	I			I/III				II/III	I
Потужність	P, Q, S, PF, DPF									
Облік енергії	kWh, kVAh, kVARh, Energy loss									
Електробезпеки (CAT; 1000/600/300)	-	-/-IV	III/IV/-			II/IV/-	-/III/IV	-/III/-	-	-
F дискр. (знач/цикл; Гц.)	-	-	7 кГц		512	500	40,96 кГц	512	1024	512
Дист. керування	N/A	-	N/A	N/A	Так	N/A	N/A	N/A	N/A	Так

При формуванні даної таблиці частота, напруга, провали та перенапруги, переривання, небаланс визначаються згідно класифікації [8] визначення класів, який наведено на початку. В свою чергу флікер визначається згідно класифікації [9], а гармоніки та інтергармоніки визначаються за класифікацією [10]. Від так, варто відмітити, що всі ЗВТ окрім необхідних згідно стандарту [8] величин вимірюють і параметри потужності та енергії. Це дозволяє використовувати ці аналізатори якості також в процесі обстеження окремого обладнання. Цікавим є і суттєва відмінність ЗВТ у рівні дискредитації даних. Так у A-eberle PQI-DA вона є найвищою, а найнижчою із відомих значень у Metrel MI 2885 Master Q4. Але у всіх він реалізований на достатньому рівні.

Загалом із отриманих результатів порівняння видно, що ЗВТ знаходяться практично на одному рівні, однак кращими все ж можна виділити A-eberle PQI-DA (який має вищий рівень дискредитації, клас F2 для визначення флікера та III/IV клас електробезпеки, хоч і призначений для напруг 300-600 В), Mavowatt 230 (в якому реалізовано дистанційне керування та клас А згідно [8]) та Metrel MI 2892 Power Master (із класом А та можливістю вимірювати напруги до 1000В).

Безумовно розглянуті аналізатори якості є високотехнологічними засобами, які дозволяють вимірювати великий спектр параметрів, однак вони не дозволяють визначити ПЯЕ від окремого приладу чи системи. Зокрема на даний час одним із найбільших спотворювачів ПЯЕ вважають ФЕС, які спричиняють не значні спотворення ПЯЕ, але можуть сильно посилювати вже наявні. Тому, маючи можливість вимірювати окремі значення, це дозволить покращувати розуміння, як про самі ФЕС так і про розподільчі мережі.

Також потрібно розуміти, що для досягнення цілей по розвитку ФЕС та загалом електричних мереж у світі, необхідним є досягнення суттєвого зниження вартості аналізаторів, яка на сьогодні є доволі високою. Для цього низка науковців [13,15,16,19] у своїх працях пропонують реалізації принципу дистанційного моніторингу, в основах якого покладена ідея використання стаціонарного датчика, який передає за допомогою телекомунікаційних систем необроблені дані на портативний комп'ютер після чого відбувається аналіз. Таким чином можна досягнути суттєвого зниження вартості та підвищити доступність ЗВТ, оскільки необхідним є купівля лише датчиків струму та напруги без обчислювальних модулів.

Як основу для проведення дистанційних обчислень та аналізу науковці [13,14,16] пропонують використовувати програмний комплекс Labview. За допомогою нього можна реалізувати всі необхідні вимірювання та забезпечити отримання даних із цілої мережі датчиків, що дозволяє реалізувати глобальну систему моніторингу якості електричної енергії. В цьому плані запропоновані компаніями A-eberle, Janitze, Schneider Electric та Powerside технологічні рішення є наближеними до необхідних, проте у них більша частина розрахунків відбувається на стороні вимірювальних датчиків.

На основі розглянутих напрацювань стає реалістичним і можливість відокремлення ПЯЕ ФЕС від основної групи. Таке виокремлення можна здійснити за допомогою залежностей ПЯЕ ФЕС від основних зовнішніх факторів, значення яких отримувати із додаткових вимірювальних датчиків.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

За результатами огляду діючої мережі українських та міжнародних нормативних документів, що визначають параметри електричних мереж та ЗВТ відмічається їхня складна ієрархія та наявність протиріч. Основні неузгодженості наявні лише в українському законодавчому полі, оскільки наразі відбувається перехід до вимог міжнародно-правових норм і стандартів [32].

Щодо складної ієрархії, то для виробників ЗВТ аналізу ПЯЕ виставляються загальні вимоги, а до деяких і додаткові, що описані вже іншими стандартами. Також при проектуванні аналізаторів якості необхідно дотримуватись рекомендації щодо електробезпеки, правильності вимірювання та багато іншого.

Огляд доступних ЗВТ показав, що при виборі аналізатора якості, необхідно спочатку відповісти собі на наступні запитання:

- сфера застосування (внутрішні електричні мережі, загальні електричні мережі, обстеження технологічного обладнання, проведення досліджень, тощо);
- час дослідження (короткочасне визначення чи постійне);
- точність дослідження;
- вимірювання додаткових параметрів (потужності, температури, вологості, тощо)
- рівень комфорту при використанні (можливість дистанційного керування, автоматичного сповіщення, дистанційного моніторингу, тощо).

Відповідь на наведені вище запитання дозволить полегшити вибір та обрати найоптимальніший варіант як в розрізі функціоналу так і ціни. В свою чергу розглянуті найпопулярніші аналізатори виявились дорогавартісними, тому їхнє часте та поширене використання неможливе. Але науковці вже мають напрацювання, які дозволили б знизити загальну вартість і створити глобальну мережу по визначенню ПЯЕ. А в подальшому за допомогою таких мереж та застосуванням штучного інтелекту можна отримати і окремі значення ПЯЕ від кожного із електричних джерел, серед яких і ФЕС. Та наразі для обстеження фотоелектричних систем найкращими є Metrel MI 2892 Power Master, виробник якого безпосередньо це вказує у документації та Powerside PQube, в якому реалізовано можливість вимірювання деяких параметрів зовнішнього середовища.

Література

1. Gada S. Improving Power Quality in Grid-Connected Photovoltaic Systems: A Comparative Analysis of Model Predictive Control in Three-Level and Two-Level Inverters [Електронний ресурс] / S. Gada, A. Fekik, M. Mahdal. – 2023. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/18/7901>
2. Сінчук І. О. Контроль якості електричної енергії в аспекті впровадження технології Micro Grid [Електронний ресурс] / І. О. Сінчук, М. Г. Котякова – Режим доступу до ресурсу: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_1/45.pdf;
3. ГОСТ 13109-97 Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837;
4. ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51529;
5. Якість електричної енергії [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>;
6. Ясько Я. А. ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ЗАГАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ НА ОСНОВІ ДСТУ EN 50160 2014 [Електронний ресурс] / Я. А. Ясько, В. В. Бабенко. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2021/paper/download/12267/10176>;
7. Методика вимірювання якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення: СОУ-Н ББ40.1-37471933-55:2011 [Електронний ресурс] // Міненерговугілля. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: https://balka-book.com/ua/bezpeka_pravila_polozhennya-813/sou_n_ee_40_1_37471933_55_2011_metodika_vimiryuvannya_yakosti_elektrichnoyi_energiyi_v_sistemah_elektropostachannya_zagalnogo_priznachennya-14666;
8. ДСТУ EN 61000-4-30:2022 Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://shop.uas.org.ua/ua/elektromagnitna-sumisnist-emc-chastina-4-30-metodi-viprobuvannja-ta-vimirjuvannja-metodi-vimirjuvannja-jakosti-elektroenergi.html>;

9. ДСТУ EN 61000-4-15:2018 Електромагнітна сумісність. Частина 4-15. Методики випробування та вимірювання. Флікерметр. Технічні вимоги до функціонування та конструкції (EN 61000-4-15:2011, IDT; IEC 61000-4-15:2010, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81771;
10. ДСТУ IEC 61000-4-7:2012 Електромагнітна сумісність. Частина 4-7. Методики випробування та вимірювання. Загальна настанова щодо вимірювання гармонік та інтергармонік від електропостачальних систем загальної призначеності й допоміжного устаткування (IEC 61000-4-7:2009, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29280;
11. ДСТУ EN 62586-2:2018 Вимірювання якості електроенергії в системах електроживлення. Частина 2. Функційні випробування та вимоги щодо невизначеності (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78046;
12. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226;
13. Subtirelu G. Power Quality Analyzer [Електронний ресурс] / G. Subtirelu, M. Dobricianu, M. Linca. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7905043/authors>;
14. Understanding Power Quality using IoT-based Smart Analyzers and Advanced Software Tools [Електронний ресурс] / [A. Alcayde, F. Montoya, F. Arrabal-Campos та ін.]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.icrepq.com/icrepq21/293-21-alcayde.pdf>;
15. Reconfigurable Power Quality Analyzer Applied to Hardware-in-Loop Test Bench [Електронний ресурс] / [B. Jahangir, A. Saddaqt, M. Hafiz та ін.]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/5134>;
16. Bhavani R. Development of Real Time Power Quality (RTPQ) Analyzer using Lab-VIEW [Електронний ресурс] / R. Bhavani, S. Ananthakumaran. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i3/C4192098319.pdf>;
17. Multi-functional power quality monitoring and report-back system [Електронний ресурс] / S.Chan, J. eng, C. Chen, D. Chang. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061510000177>;
18. Comparative tests of power quality analyzers harmonic distortion [Електронний ресурс] / [K. Chmielowiec, M. Zietek, K. Piatek та ін.]. – 2012. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6381286>;
19. Kaminsky D. Virtual Instrumentation Based Power Quality Analyzer [Електронний ресурс] / D. Kaminsky, J. Zidek, P. Bilik. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6072736>;
20. Design, power quality analysis, and implementation of smart energy meter using internet of things [Електронний ресурс] / [L. Ashok Kumar, V. Indragandhi, R. Selvamathi та ін.]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045790621001993>;
21. Карпенко С. Дистанційне калібрування аналізаторів якості електроенергії [Електронний ресурс] / С. Карпенко, О. Величко. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://odatria.org.ua/index.php/osatrq/article/view/207>;
22. Aspects of metrological calibration of power quality analyzers [Електронний ресурс] / C.Serisca, G. Seritan, S. Grigorescu, F. Argatu. – 2013. – Режим доступу до ресурсу: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6563507>;
23. 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>
24. Аналізатор якості електроенергії Клас А МІ 2892 Power Master [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://metrel.com.ua/files/MI_2892_Analizator_jakosti_elektroenergii_Klas_A_UKR_.pdf;
25. MAVOWATT 270-400 Three-Phase Energy and Power Disturbance Analyzers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [https://www.gossenmetrawatt.de/en/products/mavowatt-270-400\\$](https://www.gossenmetrawatt.de/en/products/mavowatt-270-400$);
26. АНАЛІЗАТОР ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ PQM-700UA З СЕРТИФІКАТОМ S КЛАС [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://sonel.ua/ua/p1567754-analizator-parametriv-yakosti.html>;
27. Аналізатор якості електроенергії СА 8336 [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.chauvin-arnoux.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=84;
28. HT-PQA 823 аналізатор якості електроенергії з функцією запису і сенсорним дисплеєм [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://pragmatic.com.ua/ht_pqa823;

29. PowerLogic ION7550/ION7650 Series [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.se.com/us/en/product-range/1460-powerlogic-ion7550-ion7650-series/#overview>;
30. User Manual Power Quality Network Analyser Model PQI-DA smart [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/02/BA_PQI-DA-smart_EN.pdf;
31. PQube® 3 Power Analyzers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://powerside.com/products/power-quality-measurement-solutions/pqube-3-power-analyzers/>;
32. УКРАЇНА ГАРМОНІЗУВАЛА ПОНАД 90% СТАНДАРТІВ З НОРМАМИ ЄС [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/news/ukrayina-garmonizovala-ponad-90-standartiv-z-normamy-yes/>.

References

1. Improving Power Quality in Grid-Connected Photovoltaic Systems: A Comparative Analysis of Model Predictive Control in Three-Level and Two-Level Inverters [Electronic resource] / S. Gada, A. Fekik, M. Mahdal. – 2023. – Access mode to the resource: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/18/7901>;
2. Sinchuk IO Electricity quality control in the aspect of Micro Grid technology implementation [Electronic resource] / IO Sinchuk, MG Kotyakova - Access mode to the resource: https://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2023/2_2023/part_1/45.pdf;
3. GOST 13109-97 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical means. Quality standards of electric energy in general-purpose power supply systems [Electronic resource] - Access to the resource: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837;
4. DSTU EN 50160:2014 Characteristics of the voltage of power supply in general-purpose electrical networks (EN 50160:2010, IDT) [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=51529;
5. Electricity quality [Electronic resource] - Access mode to the resource: <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi>;
6. Yasko Ya. A. Characteristics of the voltage of electricity supply in general-purpose electrical networks based on DSTU EN 50160 2014 [Electronic resource] / Ya: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-feeem/all-feeem-2021/paper/download/12267/10176>;
7. Methodology for measuring the quality of electricity in general-purpose power supply systems: SOU-N EE40.1-37471933-55:2011 [Electronic resource] // Ministry of Energy and Coal Industry. - 2012: https://balka-book.com/ua/bezpeka_pravila_polozhennya-813/sou_n_ee_40_1_37471933_55_2011_metodika_vimiryuvannya_yakosti_elektrichnoyi_energiyi_v_sistemah_elektropostachannya_zagalnog_o_priznachennya-14666;
8. DSTU EN 61000-4-30: 2022 Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30. Test and measurement methods. Methods for measuring the quality of electricity (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT) [Electronic resource] - Access mode to the resource: <http://shop.uas.org.ua/ua/elektromagnitna-sumisnist-emc-chastina-4-30-metodi-viprobuвання-ta-vimirjuвання-metodi-vimirjuвання-jakosti-elektroenergi.html>;
9. DSTU EN 61000-4-15: 2018 Electromagnetic compatibility. Part 4-15. Test and measurement methods. Flicker meter. Technical requirements for functioning and design (EN 61000-4-15:2011, IDT; IEC 61000-4-15:2010, IDT) [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=81771;
10. DSTU IEC 61000-4-7: 2012 Electromagnetic compatibility. Part 4-7. Test and measurement methods. General guideline for the measurement of harmonics and interharmonics from general-purpose power supply systems and auxiliary equipment (IEC 61000-4-7:2009, IDT) [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29280;
11. DSTU EN 62586-2:2018 Measurement of power quality in power supply systems. Part 2. Functional tests and uncertainty requirements (EN 62586-2:2017, IDT; IEC 62586-2:2017, IDT) [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78046;
12. DSTU EN 50160:2023 Characteristics of the supply voltage in general-purpose electrical networks (EN 50160:2022, IDT) [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226;
13. Subtirelu G. Power Quality Analyzer [Electronic resource] / G. Subtirelu, M. Dobriceanu, M. Linca. - 2017: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7905043/authors>;
14. Understanding Power Quality using IoT-based Smart Analyzers and Advanced Software Tools [Electronic resource] / [A. Alcaide, F. Montoya, F. Arrabal-Campos et al. 2021]: <https://www.icrepq.com/icrepq21/293-21-alcaide.pdf>;
15. Reconfigurable Power Quality Analyzer Applied to Hardware-in-Loop Test Bench [Electronic resource] / [B. Jahangir, A. Saddaqt, M. Hafiz et al: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/16/5134>;
16. Bhavani R. Development of Real Time Power Quality (RTPQ) Analyzer using Lab-VIEW [Electronic resource] / R. Bhavani, S. Ananthakumaran. - 2019. - Access mode to the resource: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i3/C4192098319.pdf>;
17. Multi-functional power quality monitoring and report-back system [Electronic resource] / S. Chan, J. eng, C. Chen, D. Chang. - 2010: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061510000177>;
18. Comparative tests of power quality analyzers harmonic distortion [Electronic resource] / [K. Chmielowiec, M. Zietek, K. Piatek et al. 2012] - Accessed at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6381286>;
19. Kaminsky D. Virtual Instrumentation Based Power Quality Analyzer [Electronic resource] / D. Kaminsky, J. Zidek, P. Bilik. - 2011: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6072736>;
20. Design, power quality analysis, and implementation of smart energy meter using internet of things [Electronic resource] / [L. Ashok Kumar, V. Indragandhi, R. Selvamathi et al: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045790621001993>;
21. Karpenko S. Remote calibration of electricity quality analyzers [Electronic resource] / S. Karpenko, O. Velychko. - 2013: <https://odatra.org.ua/index.php/osatrq/article/view/207>;
22. Aspects of metrological calibration of power quality analyzers [Electronic resource] / C. Cepisca, G. Seritan, S. Grigorescu, F. Argatu. - 2013. - Access mode to the resource: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6563507>;
23. Fluke 430 Series II Three-Phase Power Quality and Energy Analyzers Technical Data [Electronic resource] - Access mode to the resource: <https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/Fluke-430-II-PQ-Analysers-Data-Sheet.PDF?jvpPx9LB3aVXQ4WeJmcUc5FXfjXq,ULW>;
24. MI 2892 Power Master Class A Power Quality Analyzer [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://metrel.com.ua/files/MI_2892_Analizator_jakosti_elektroenergi_Klas_A_UKR_.pdf;
25. MAVOWATT 270-400 Three-Phase Energy and Power Disturbance Analyzers [Electronic resource] - Access mode to the resource: <https://www.gossenmetrawatt.de/en/products/mavowatt-270-400>;

26. PQM-700UA ELECTRICITY QUALITY PARAMETERS ANALYZER WITH S CLASS CERTIFICATE [Electronic resource] - Access mode to the resource: <https://sonel.ua/ua/p1567754-analizator-parametriv-yakosti.html>;
27. Power Quality Analyzer CA 8336 [Electronic resource] - Access mode to the resource: https://www.chauvin-arnoux.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=84;
28. HT-PQA 823 power quality analyzer with recording function and touch screen display [Electronic resource] - Resource access mode: https://pragmatic.com.ua/ht_pqa823/;
29. PowerLogic ION7550/ION7650 Series [Electronic resource] - Resource access mode: <https://www.se.com/us/en/product-range/1460-powerlogic-ion7550-ion7650-series/#overview>;
30. User Manual Power Quality Network Analyzer Model PQI-DA smart [Electronic resource] - Resource access mode: https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/02/BA_PQI-DA-smart_EN.pdf;
31. PQube® 3 Power Analyzers [Electronic resource] - Resource access mode: <https://powerside.com/products/power-quality-measurement-solutions/pqube-3-power-analyzers/>;
32. UKRAINE HARMONIZED MORE THAN 90% OF STANDARDS WITH EU NORMS [Electronic resource] - Access to the resource: <https://eu-ua.kmu.gov.ua/news/ukrayina-garmonizovala-ponad-90-standartiv-z-normamy-yes/>.