https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-08
УДК 621.311.1:621.314.1:006.05

[1]Є. П. КЛЮЧКА,
асистент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kluchka1992@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1020-9719
[1]В. С. ВІТЕР,
аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: vitervladislav215@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3882-4675

[1]Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА НОРМАТИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЩОДО ЇХ ПІДВИЩЕННЯ НА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ ТРАДИЦІЙНОГО ТА ПОНОВЛЮВАЛЬНОГО ТИПІВ

У статті розглянуто показники якості електроенергії та нормативну базу, яка визначає вимоги до їх контролю і поліпшення на електростанціях традиційного та поновлювального типів. Вихідною передумовою є те, що зміна структури генерації не просто збільшує кількість джерел у мережі, а змінює сам характер відхилень: для синхронних енергоблоків типовими залишаються задачі підтримання частоти, напруги, реактивної потужності та стійкості режимів, тоді як для вітрових і сонячних електростанцій, особливо при інверторному приєднанні, зростає значення гармонік, інтергармонік, небалансу, швидких змін напруги та флікера. Показано, що оцінювання якості електроенергії не може зводитися до одного узагальненого показника, оскільки різні групи показників відображають різні механізми погіршення режиму й вимагають різних технічних рішень. У роботі систематизовано базові показники якості електроенергії – відхилення напруги та частоти, коефіцієнти гармонічних спотворень, показники небалансу й флікера. Окрему увагу приділено чинним документам, що формують нормативне поле в Україні: ДСТУ EN 50160:2023, ДСТУ EN 61000-4-30:2022, ДСТУ EN 61000-2-2:2022, ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022, галузевим СОУ НЕК та регуляторним матеріалам НКРЕКП. Показано, що існуюча нормативна база має проблему розшарування вимог між характеристиками якості, методами вимірювання, рівнями сумісності, випробуваннями стійкості обладнання та галузевими процедурами моніторингу. Виявлено також ознаки методичної неузгодженості між окремими чинними та довідковими матеріалами. На цій підставі запропоновано напрями удосконалення нормативного забезпечення: гармонізацію регуляторних і технічних документів, запровадження безперервного моніторингу на вузлах генерації, окреме нормування для інверторно-приєднаних джерел, а також поєднання вимог до якості електроенергії з підходами до цифрового обліку. Такий підхід дає змогу розглядати підвищення якості електроенергії не як локальне виправлення окремих відхилень, а як системну задачу проєктування, експлуатації та регулювання режимів електростанцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: енергетичне обладнання, електростанція, показники якості, ефективність роботи, ККД, питома витрата палива, надійність, готовність, турбіна, котел, генератор, комплексний показник якості.

Як цитувати: Ключка Є. П., Вітер В. С. Аналіз показників якості електроенергії та нормативного забезпечення щодо їх підвищення на електростанціях традиційного та поновлювального типів. Машнобудування. 2026. Вип. 37. С. 97-105. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-08

© Ключка Є. П., Вітер В. С., 2026

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Якість електроенергії на електростанції формується не лише в точці приєднання до мережі, а й усередині власної схеми електропостачання, у системах збудження, перетворювачах, вузлах компенсації реактивної потужності, трансформаторах та алгоритмах керування генерацією. Для традиційних станцій критичними залишаються точність підтримання частоти й напруги, стійкість при зміні навантаження, комутаційні режими та вплив потужних електроприймачів власних потреб. Для поновлювальних електростанцій спектр проблем зміщується в бік гармонічних спотворень, швидких змін напруги, небалансу, взаємодії інверторів із “слабкими” мережами та залежності показників якості від режимів керування. Через це одна й та сама нормативна вимога може по-різному реалізовуватися на тепловій, гідравлічній, вітровій чи сонячній електростанції. Наукове завдання полягає у поєднанні метрологічно коректного опису показників якості з аналізом придатності чинного нормативного поля до нової структури генерації. Практичне значення такої постановки пов’язане з вибором засобів моніторингу, фільтрації, компенсації, налаштування регуляторів та підготовкою вимог до модернізації електростанцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових публікаціях останнього часу простежується перехід від опису окремих відхилень напруги до системного аналізу якості електроенергії в мережах із високою часткою перетворювальної генерації. Так, в роботі [1] авторами доведено, що для мереж, інтегрованих з офшорною вітрогенерацією, набір релевантних подій уже не обмежується усталеними гармоніками чи провалами напруги; на перший план виходять поєднані режими, в яких якість електроенергії, електромагнітна сумісність і алгоритми моніторингу мають розглядатися разом. Публікації [2, 3] підтверджують це на польових даних: вплив вітроустановок виявляється локально, залежить від жорсткості мережі та режимів комутації, а допустимість середніх значень не виключає небажаного впливу на чутливі навантаження.

Окремий напрям становлять дослідження засобів активного керування режимом. У роботі [4] узагальнено сучасні стратегії автоматичного керування реактивною потужністю залежно від напруги для мереж із великим вкладом відновлювальних джерел енергії (ВДЕ); показано, що локального регулювання напруги вже недостатньо без координації інверторів, накопичувачів енергії та засобів компенсації. Автори [5] систематизували типові проблеми розподіленої генерації: гармоніки, флікер, небаланс, коливання напруги та пов’язані з ними засоби покращення. В якості технічної бази підвищення якості електроенергії розглядаються активні силові фільтри [6], а інші дослідження [7] демонструють, що навіть у моделюванні мікромережі показники якості істотно залежать від структури джерел, нелінійності навантаження та сценарію керування.

Нормативний блок досліджень також змінився. Базовим документом для характеристик напруги електропостачання в мережах загального призначення є ДСТУ EN 50160:2023 [8]. Методи вимірювання показників якості електроенергії визначає ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [9], а рівні сумісності для низькочастотних кондактивних збурень у низьковольтних мережах – ДСТУ EN 61000-2-2:2022 [10]. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [11] регламентує випробування на несприйнятливість до провалів напруги, короткочасних переривань та змін напруги. Галузеву деталізацію для автоматизованих систем контролю містить СОУ НЕК 17.220.1-33:2024 [12], а норми якості в магістральних і міждержавних мережах – СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 [13]. Додатково увагу привертають стандарти управління активами, зокрема ISO 55001:2024 [14], оскільки якість електроенергії дедалі більше залежить від життєвого циклу обладнання, а не лише від моментних режимів. Регуляторні матеріали НКРЕКП [15] зводять у практичну площину допустимі значення окремих показників та процедури їх оцінювання.

Попри велику кількість робіт, у літературі зберігаються два вузькі місця. Перше – розрив між технічними дослідженнями засобів покращення якості електроенергії та аналізом чинності й узгодженості нормативних документів. Друге – недостатня прив'язка нормативних вимог саме до типу електростанції: для традиційної синхронної генерації та для інверторно-приєднаних ВДЕ технічні механізми появи відхилень різні, але в регулюванні вони ще не завжди розмежовані з потрібною деталізацією.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета роботи полягає у системному аналізі показників якості електроенергії та чинного нормативного забезпечення щодо їх підвищення на електростанціях традиційного та поновлювального типів.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

- узагальнити основні показники якості електроенергії та подати формули їх визначення;
- показати відмінності у механізмах погіршення якості електроенергії на традиційних і поновлювальних електростанціях;
- проаналізувати чинні ДСТУ, СОУ НЕК, ISO та регуляторні матеріали, що стосуються контролю і підвищення якості електроенергії;
- виявити нормативні неузгодженості та окреслити напрями вдосконалення нормативного поля.

Виклад основного матеріалу

1. Аналіз показників якості електроенергії

Показники якості електроенергії відображають ступінь відповідності режиму електропостачання встановленим технічним вимогам. Для електростанцій традиційного та поновлювального типів перелік основних показників загалом є спільним, однак джерела їх відхилення, тривалість збурень і характер впливу на мережу відрізняються. Для синхронної генерації типовими є відхилення, зумовлені зміною навантаження, режимами регулювання збудження, комутаціями потужного обладнання та роботою власних потреб. Для сонячних і вітрових електростанцій суттєвого значення набувають процеси, пов'язані з роботою силових перетворювачів, зміною погодних умов, швидкістю регулювання інверторів, локальною жорсткістю мережі та режимами компенсації реактивної потужності. Тому оцінювання якості електроенергії доцільно проводити не за одним узагальненим критерієм, а за системою взаємопов'язаних показників, серед яких основними є відхилення напруги, відхилення частоти, гармонічні спотворення, небаланс напруги, флікер, провали напруги, короткочасні переривання та швидкі зміни напруги.

Одним із базових показників є відхилення напруги від номінального значення. Його зручно описувати виразом:

$$\delta_U = \frac{U - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

де U — виміряне середньоквадратичне значення напруги; $U_{\text{н}}$ – номінальна напруга.

Цей показник характеризує зміну усталеного рівня напруги відносно значення, на яке розраховано приєднане обладнання. Для електростанції він є чутливим до режиму навантаження, схеми приєднання, параметрів трансформаторів, налаштування систем автоматичного регулювання напруги та наявності джерел або споживачів реактивної потужності.

Іншим фундаментальним показником є відхилення частоти:

$$\delta_f = \frac{f - f_{\text{н}}}{f_{\text{н}}} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

де f – поточне значення частоти, $f_{\text{н}}$ – номінальна частота енергосистеми. Частота безпосередньо пов'язана з балансом активної потужності. Для традиційних електростанцій її підтримання визначається характеристиками турбін, регуляторів швидкості та участю блоку в первинному й вторинному регулюванні. Для поновлювальної генерації ситуація складніша, оскільки значна частина станцій приєднується через інверторні системи, що не забезпечують інерційної підтримки частоти в класичному розумінні або забезпечують її лише в алгоритмічно обмеженій формі.

Вагоме місце в аналізі якості електроенергії займають гармонічні спотворення. Індивідуальний коефіцієнт гармонічної складової напруги доцільно визначати:

$$K_{U(h)} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100\%, \qquad (3)$$

де U_h – середньоквадратичне значення напруги гармоніки порядку h; U_1 – середньоквадратичне значення основної гармоніки.

Для інтегральної оцінки гармонічного складу застосовують коефіцієнт сумарного гармонічного спотворення напруги:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} U_h^2}}{U_1} \cdot 100\%, \qquad (4)$$

де H – максимальний порядок гармоніки, що враховується під час розрахунку.

На традиційних електростанціях джерелами гармонік можуть бути тиристорні перетворювачі, системи збудження, частотно-керовані приводи та нелінійні споживачі власних потреб. На поновлювальних електростанціях основний внесок зазвичай створюють силові електронні перетворювачі інверторного типу.

Для трифазних мереж важливим показником є небаланс напруги. Його можна оцінювати через складники симетричних послідовностей. Коефіцієнт небалансу за напругою зворотної послідовності:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_{11}} \cdot 100\%, \qquad (5)$$

де U_2 – напруга зворотної послідовності; U_{11} – напруга прямої послідовності основної гармоніки.

За потреби також використовують коефіцієнт нульової послідовності:

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{11}} \cdot 100\%, \qquad (6)$$

де U_0 – напруга нульової послідовності.

Небаланс напруги спричиняє додаткові втрати, нагрів електричних машин, погіршення умов роботи силових трансформаторів та зниження ресурсу обладнання. Для електростанцій він може бути пов’язаний як із зовнішніми мережевими умовами, так і з несиметрією внутрішніх навантажень.

Окрему групу показників становлять коливання напруги та зумовлений ними флікер. Довготривалий флікер визначають за виразом:

$$P_{lt} = \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{st,i}^3 \right)^{1/3}, \qquad (7)$$

де $P_{st,i}$ – значення короткотривалого флікера на i-му інтервалі спостереження.

Цей показник відображає ступінь помітності коливань світлового потоку, спричинених змінами напруги. Для електростанцій традиційного типу флікер може бути пов’язаний з комутацією потужних механізмів, пуском електродвигунів або різкими змінами навантаження, тоді як для вітрових та сонячних станцій він часто виникає через змінність генерації та особливості роботи систем керування.

Для аналізу короткочасних порушень електропостачання використовують показники провалів напруги, перенапруги і переривань. Глибина провалу напруги визначається як:

$$d = \frac{U_н - U_{min}}{U_н} \cdot 100\%, \qquad (8)$$

де U_{min} – мінімальне середньоквадратичне значення напруги під час події.

У цьому випадку істотне значення має не лише глибина провалу, а й його тривалість, оскільки однакові за ампулітудою події можуть по-різному впливати на релейний захист, приводи, автоматику та системи керування. Для електростанції ці явища мають особливе значення, оскільки навіть короткочасні відхилення можуть призвести до спрацювання захистів, втрати частини навантаження або порушення стійкості технологічного процесу.

Таким чином, аналіз показників якості електроенергії повинен спиратися на сукупність параметрів, кожен із яких характеризує окремий аспект режиму електропостачання. Відхилення напруги і частоти дають уявлення про загальний стан режиму, гармонічні складові відображають ступінь електромагнітного спотворення, коефіцієнти небалансу показують симетричність трифазної системи, а флікер і провали напруги характеризують динамічні порушення. Для традиційних і поновлювальних електростанцій сам перелік показників залишається спільним, але їх фізична природа, інтенсивність прояву та засоби зниження відрізняються. Саме тому технічний аналіз цих показників має бути пов’язаний не лише з вимірюванням параметрів, а й з типом генерації, структурою приєднання до мережі та режимами керування електростанцією.

2. Аналіз нормативного забезпечення щодо підвищення показників якості електроенергії на електростанціях, прогалини та шляхи удосконалення

Чинна нормативна база Україні побудована за багаторівневою схемою (рис.1.). На верхньому рівні перебувають документи, які описують самі характеристики якості електроенергії, насамперед ДСТУ EN 50160:2023 [8]. Наступний рівень становлять документи, що визначають методи вимірювання і правила оцінювання – ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [9]. Окремо існує рівень сумісності для типових низькочастотних збурень – ДСТУ EN 61000-2-2:2022 [10], а також рівень випробувань стійкості обладнання до характерних подій мережі – ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022 [11]. Галузевий вимір представлений СОУ НЕК 17.220.1-33:2024, який орієнтований на проєктування автоматизованих систем обліку і контролю показників якості електроенергії [12], та СОУ НЕК 03.120.4-14:2021, який стосується норм якості в магістральних та міждержавних мережах [13]. Регуляторний контур практичного застосування відображено в матеріалах НКРЕКП [15].

Рис. 1 – Структура нормативної бази України щодо підвищення показників якості електроенергії
Fig. 1 – Structure of the regulatory framework of Ukraine for improving electricity quality indicators

Структура показує, що нормативна база вже містить усі базові складові – характеристики, вимірювання, сумісність, випробування та галузеві процедури. Проблема полягає в іншому: ці складові рознесено між документами з різною сферою дії, і на рівні електростанції їх не завжди зведено в єдину процедуру управління якістю електроенергії. Для традиційної електростанції це означає ризик того, що контроль залишиться зосередженим на точці відпуску в мережу, а внутрішні причини відхилень не буде системно простежено. Для поновлювальної електростанції ризик інший: стандарти описують параметри й методи вимірювання, але недостатньо чітко відокремлюють процедури для інверторно-приєднаних джерел, де механізми появи гармонік, флікера чи швидких змін напруги відрізняються від синхронної генерації [1, 4, 5, 8-13].

Окремою прогалиною є методична неузгодженість між чинною технічною базою та частиною публічних роз'яснень. НКРЕКП у матеріалі щодо якості електроенергії посилається на ДСТУ EN 50160:2023 як на документ, що задає параметри в точках приєднання споживачів, і водночас наводить конкретні орієнтири для 10-хвилинних значень напруги, частоти, флікера, складника зворотної послідовності та гармонік [15]. Проте в тому ж матеріалі вимірювання параметрів якості електроенергії прив'язано до ДСТУ IEC 61000-4-30:2010, тоді як чинним базовим стандартом методів вимірювання є ДСТУ EN 61000-4-30:2022 [9, 15]. Це не скасовує самих вимог до контролю, але створює зайву колізію для практики: при аудиті, метрологічному забезпеченні та закупівлі приладів електростанція має орієнтуватися на актуальний документ, а довідкові й регуляторні матеріали повинні бути синхронізовані з ним.

Шляхи удосконалення нормативного забезпечення доцільно формулювати не як нескінченне розширення переліку норм, а як їхню інтеграцію. По-перше, потрібна пряма гармонізація регуляторних матеріалів і галузевих СОУ з чинними версіями ДСТУ. По-друге, для електростанцій доцільно закріпити вимогу безперервного моніторингу показників якості не лише в точці зовнішнього приєднання, а й на критичних внутрішніх шинах, вузлах перетворення та приєднання власних потреб. По-третє, нормативне поле варто деталізувати за типами генерації: для традиційних станцій – акцент на регулюванні напруги, частоти, комутаційних режимах та стані обладнання; для ВДЕ – на гармоніках, флікері, швидких змінах напруги, режимах інвертора та засобах реактивної підтримки. По-четверте, до процедур забезпечення якості електроенергії варто прив'язати підходи управління активами, оскільки деградація силових трансформаторів, фільтрів, компенсуючих пристроїв та вимірювальних систем безпосередньо впливає на якість напруги. У цьому аспекті ISO 55001:2024 може виступати не спеціальним стандартом з якості електроенергії, а рамкою для управління обладнанням, стан якого визначає здатність електростанції дотримуватися технічних вимог [4-6, 12, 14, 15].

Висновки

Якість електроенергії на електростанціях доцільно оцінювати за сукупністю показників, а не за одним інтегральним критерієм. Найбільш інформативними для практики залишаються відхилення напруги і частоти, гармонічні спотворення, небаланс, флікер та характеристики провалів напруги. Механізми появи відхилень різняться залежно від типу генерації. Для традиційних станцій вирішальними є режими синхронної машини, системи збудження та комутаційні процеси. Для поновлювальних станцій – режими перетворення енергії, інверторне керування, змінність генерації та взаємодія з мережею. Чинна нормативна база України охоплює базові характеристики якості електроенергії, методи їх вимірювання, рівні сумісності, випробування стійкості обладнання та галузеві процедури контролю. Її сильна сторона – наявність актуалізованих ДСТУ 2022-2024 років; слабка – фрагментованість застосування на рівні електростанції. Виявлена методична неузгодженість між частиною регуляторних роз'яснень і чинною базою вимірювання показників якості електроенергії. Усунення таких розривів є необхідною умовою коректного метрологічного забезпечення та технічного аудиту. Удосконалення нормативного забезпечення доцільно спрямувати на гармонізацію документів, обов'язковий моніторинг якості на критичних вузлах генерації.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review / Shao H., Henriques R., Morais H., Tedeschi E. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2024. Vol. 191. Art. 114094. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114094 .

2. Skibko Z., Hołdyński G., Borusiewicz A. Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters–Example from Poland. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 15. Art. 5573. DOI: https://doi.org/10.3390/en15155573 .

3. Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm / Skibko Z., Tymińska M., Romaniuk W., Borusiewicz A. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 13. Art. 7279. DOI: https://doi.org/10.3390/su13137279 .

4. State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids / Gholami K., Islam M. R., Rahman M. M., Azizivahed A., Fekih A. *Energy Reports*. 2022. Vol. 8. P. 8630–8651. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.080 .

5. Etanya T. F., Tsafack P., Ngwashi D. K. Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review. *Energy Reports*. 2025. Vol. 13. P. 3181-3203. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050 .

6. A comprehensive review of improving power quality using active power filters / Li D., Wang T., Pan W., Ding X., Gong J. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 199. Art. 107389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107389 .

7. Power Quality Analysis of a Microgrid-Based on Renewable Energy Sources: A Simulation-Based Approach / Hernández-Mayoral E., Jiménez-Román C. R., Enriquez-Santiago J. A., López-López A., González-Domínguez R. A., Ramírez-Torres J. A., Rodríguez-Romero J. D., Jaramillo O. A. *Computation*. 2024. Vol. 12. No. 11. Art. 226. DOI: https://doi.org/10.3390/computation12110226 .

8. ДСТУ EN 50160:2023. *Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності* (EN 50160:2022, IDT). Чинний від 08.12.2023.

9. 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). Чинний від 31.12.2023.

10. ДСТУ EN 61000-2-2:2022. *Електромагнітна сумісність. Частина 2-2. Навколишнє середовище. Рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних збурень та сигналів у системах електропостачання загальної призначеності низької напруги*. Чинний від 01.09.2023.

11. ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022. *Електромагнітна сумісність. Частина 4-11. Методики випробування та вимірювання. Випробування на несприйнятливість до провалів напруги, короткочасних переривань та змінень напруги для обладнання з силою вхідного струму до 16 А на фазу*. Чинний від 01.09.2023.

12 .СОУ НЕК 17.220.1-33:2024. *Методичні рекомендації щодо проєктування автоматизованих систем обліку та контролю показників якості електроенергії на підстанціях НЕК Укренерго*. Чинний від 16.04.2024.

13. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021. *Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго. Зміна № 1*. Чинний від 26.11.2021.

14. ISO 55001:2024. Asset management – Asset management system – Requirements. Published, Edition 2. 2024.

15 Якість електричної енергії. НКРЕКП. Оновлено 20.11.2025.

Отримано: 20.03.2026 / Переглянуто: 27.04.2026 / Прийнято: 25.05.2026 / Опубліковано: 30.05.2026

[1]Y. KLIUCHKA,
Assistant of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: kluchka1992@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1020-9719
[1]V. VITER,
Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies
e-mail: vitervladislav215@gmail.com ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3882-4675
[1]V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

ANALYSIS OF THE IMPACT OF QUALITY INDICATORS ON THE OPERATIONAL EFFICIENCY OF POWER PLANT ENERGY EQUIPMENT

The article examines the influence of quality indicators of the main power plant energy equipment on the efficiency of electric and thermal energy production. It is shown that under current conditions of limited flexible generation capacity, aging power units, and increasing requirements for fuel economy, environmental safety, and operational flexibility, the assessment of energy equipment quality extends beyond the traditional analysis of nominal efficiency alone. For turbines, boilers, condensers, generators, control systems, and cooling systems, not only energy-related characteristics but also reliability, operational, lifetime, and maintenance characteristics become decisive. It is substantiated that the operational efficiency of energy equipment is formed under the influence of a set of interrelated indicators, including efficiency, specific fuel consumption, reliability, availability, capacity factor, the level of losses in auxiliary systems, thermodynamic perfection, and the stability of parameters over time.

Modern studies devoted to steam turbine degradation, combustion optimization in boilers, the effect of excess air on efficiency, the exergetic distribution of losses among the main units of thermal power plants, increasing the efficiency of turbine installations under variable operating modes, improving turbogenerator cooling systems, as well as issues of equipment reliability and safe operation, are analyzed. It has been established that individual quality indicators have a quantitatively significant influence on operating performance. In particular, long-term degradation of steam turbines may cause a power loss at the level of (2–7,5)%; an increase in excess air in the boiler from 10% to 70% leads to a decrease in energy and exergetic efficiency by approximately 5%; the integration of thermal energy storage systems and the improvement of operating modes can increase maneuverability by 3–4 times and improve the profitability of a power plant. For certain turbine units, rationalization of the reheated steam temperature provided an increase in efficiency of (0,3–1,5)% and a reduction in specific equivalent fuel consumption by (3–4) g standard fuel/kWh.

A system of individual quality indicators of power equipment and a comprehensive quality indicator suitable for multicriteria assessment is proposed. It is shown that the greatest impact on the integrated efficiency of power plants is exerted by the quality indicators of turbine, boiler, and condensing equipment, as well as the reliability of generators and auxiliary systems. The results can be used in technical diagnostics, modernization, optimization of operating modes, and substantiation of priorities for repair and reconstruction of power plant energy equipment.

***Keywords*:** energy equipment, power plant, quality indicators, operational efficiency, efficiency, specific fuel consumption, reliability, availability, turbine, boiler, generator, comprehensive quality indicator.

In cites: Kliuchka Y., Viter V. (2026). Analysis of the impact of quality indicators on the operational efficiency of power plant energy equipment. Engineering, (37), 97-105. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2026-37-08 (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

Reference:

1. Shao, H, Henriques, R, Morais, H & Tedeschi, E 2024, 'Power quality monitoring in electric grid integrating offshore wind energy: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 191, Art. 114094. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114094 .

2. Skibko, Z, Hołdyński, G & Borusiewicz, A 2022, 'Impact of Wind Power Plant Operation on Voltage Quality Parameters–Example from Poland', *Energies*, Vol. 15, No. 15, Art. 5573. DOI: https://doi.org/10.3390/en15155573 .

3. Skibko, Z, Tymińska, M, Romaniuk, W & Borusiewicz, A 2021, 'Impact of the Wind Turbine on the Parameters of the Electricity Supply to an Agricultural Farm', *Sustainability*, Vol. 13, No. 13, Art. 7279. DOI: https://doi.org/10.3390/su13137279 .

4. Gholami, K, Islam, MR, Rahman, MM, Azizivahed, A & Fekih, A 2022, 'State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids', *Energy Reports*, Vol. 8, P. 8630–8651. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.06.080 .

5. Etanya, TF, Tsafack, P & Ngwashi, DK 2025, 'Grid-connected distributed renewable energy generation systems: Power quality issues, and mitigation techniques – A review', *Energy Reports*, Vol. 13, P. 3181-3203. DOI: https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.02.050 .

6. Li, D, Wang, T, Pan, W, Ding, X & Gong, J 2021, 'A comprehensive review of improving power quality using active power filters', *Electric Power Systems Research*, Vol. 199, Art. 107389. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107389 .

7. Hernández-Mayoral, E, Jiménez-Román, CR, Enriquez-Santiago, JA, López-López, A, González-Domínguez, RA, Ramírez-Torres, JA, Rodríguez-Romero, JD & Jaramillo, OA 2024, 'Power Quality Analysis of a Microgrid-Based on Renewable Energy Sources: A Simulation-Based Approach', *Computation*, Vol. 12, No. 11, Art. 226. DOI: https://doi.org/10.3390/computation12110226 .

8. DSTU EN 50160:2023. *Harakteristiki naprugi elektropostachannya v elektrichnih merezhah zagalnoyi priznachenosti* (EN 50160:2022, IDT). Chinnij vid 08.12.2023 [DSTU EN 50160:2023. Characteristics of the supply voltage in public power networks (EN 50160:2022, IDT).].

9. DSTU EN 61000-4-30:2022. *Elektromagnitna sumisnist (EMC). Chastina 4-30. Metodi viprobuvannya ta vimiryuvannya. Metodi vimiryuvannya yakosti elektroenergiyi* (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT). Chinnij vid 31.12.2023 [DSTU EN 61000-4-30:2022. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-30. Test and measurement methods. Power quality measurement methods (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT).] (in Ukraine).

10. DSTU EN 61000-2-2:2022. *Elektromagnitna sumisnist. Chastina 2-2. Navkolishnye seredovishe. Rivni sumisnosti dlya nizkochastotnih konduktivnih zburen ta signaliv u sistemah elektropostachannya zagalnoyi priznachenosti nizkoyi naprugi.* Chinnij vid 01.09.2023 [DSTU EN 61000-2-2:2022. Electromagnetic compatibility. Part 2-2. Environmental environment. Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signals in general purpose low-voltage power supply systems.] (in Ukraine).

11. DSTU EN IEC 61000-4-11:2022. *Elektromagnitna sumisnist. Chastina 4-11. Metodiki viprobuvannya ta vimiryuvannya. Viprobuvannya na nesprijnyatlivist do provaliv naprugi, korotkochasnih pererivan ta zminen naprugi dlya obladnannya z siloyu vhidnogo strumu do 16 A na fazu*. Chinnij vid 01.09.2023 [DSTU EN IEC 61000-4-11:2022. Electromagnetic compatibility. Part 4-11. Testing and measurement methods. Testing for immunity to voltage dips, short interruptions and voltage variations for equipment with input currents up to 16 A per phase.] (in Ukraine).

12 SOU NEK 17.220.1-33:2024. *Metodichni rekomendaciyi shodo proyektuvannya avtomatizovanih sistem obliku ta kontrolyu pokaznikiv yakosti elektroenergiyi na pidstanciyah NEK Ukrenergo*. Chinnij vid 16.04.2024 [SOU NEK 17.220.1-33:2024. Methodological recommendations for the design of automated systems for the control of electricity quality indicators at substations of NEK Ukrenergo.] (in Ukraine).

13. SOU NEK 03.120.4-14:2021. *Normi yakosti elektrichnoyi energiyi v magistralnih ta mizhderzhavnih elektrichnih merezhah NEK Ukrenergo. Zmina № 1*. Chinnij vid 26.11.2021 [SOU NEK 03.120.4-14:2021. Standards for the quality of electric energy in main and interstate electric networks of NEK Ukrenergo. Amendment No. 1.] (in Ukraine).

14. ISO 55001:2024. *Asset management – Asset management system – Requirements*. Published, Edition 2/ 2024 (in Ukraine).

15 NKREKP *2025, Yakist elektrichnoyi energiyi* [The quality of electric energy] (in Ukraine).

Submission received:03.20.2026/Revised: 04.27.2026/Accepted: 05.25.2026/Published: 05.30.2026