Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет "Дніпровська політехніка"

Вроцлавський технічний університет

Ройтлінгенський технічний університет

МІЖНАРОДНА НАУКОВО-ПРАКТИЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ – 2024

МЕТА КОНФЕРЕНЦІЇ

Обговорення проблем енергозбереження та енергоефективності, а також актуальних питань, що виникають при розробці та експлуатації електрообладнання, економічних та екологічних аспектів електроенергетики, нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії

20 грудня 2024 р.

Дніпро

НТУ "Дніпровська політехніка"

Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2020. Збірник тез. Дніпро. НТУ "ДП". 20 грудня 2024 р. – 150 с.

Матеріали друкуються в редакційній обробці авторів.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри електротехніки к.т.н., доцент Ципленков Д.В

УДК 681.518.54

Рева В.С. аспірант спеціальності 134 Авіаційна та ракетно-космічна техніка [1]
Папаїка Ю. А., д.т.н., професор, завідувач кафедри електротехніки [2]
([1]Державне Підприємство Конструкторське Бюро «Південне» ім М.К. Янгеля, Дніпро, Україна
[2]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

МОНІТОРИНГ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОСМІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

На сьогоднішній день в Україні показники якості електричної енергії майже не контролюються. Електропередавальні організації при видачі технічних умов на підключення споживачів електроенергії і при укладенні договорів про постачання електроенергії не включають в них вимоги за показниками якості електроенергії, не визначають умови здійснення контролю ПЯЕ.

Подібна ситуація відбувається і в місцях розташування (базування) сучасних космодромів, наприклад ПЦ Алкантара (Бразилія) де космодром розташований в одній з найвіддаленіших місцевостях країни, на значній відстані від інфраструктури та центру країни. Це призводить до необґрунтованих економічних втрат багатьох споживачів електроенергії, що є наслідком зниження ефективності використання технологічного електрообладнання, як наслідок виходу його з ладу.

При цьому розробка заходів щодо забезпечення якості електроенергії можлива тільки після оцінки фактичного стану якості електроенергії у всіх вузлах електричної мережі. Тому в основі системи забезпечення якості електричної енергії повинна бути система її моніторингу.

Проведення моніторингу дозволяє сформувати статистичну базу даних вимірювань, що в свою чергу дозволяє прогнозувати процеси в електричній мережі, визначати очікувані рівні надійності електропостачання та якості електроенергії в майбутньому, планувати необхідні заходи щодо забезпечення надійності електропостачання та якості електроенергії.

Для підвищення надійності та інформативності отриманих результатів проведення моніторингу якості електроенергії, а також для підвищення оперативності управління якістю електричної енергії контроль її показників повинен проводитися безперервно [1]. Створення при цьому системи моніторингу якості електричної енергії в режимі реального часу дозволить проводити своєчасний контроль її показників і їх відхилень і виконувати відповідні заходи щодо приведення показників якості електроенергії відповідно до вимог технічного завдання.

Для забезпечення якісним, безперебійним, надійним електроживленням споживачів електроенергії технологічного обладнання космодромів було прийнято рішення про створення повноцінної системи контролю якості електроенергії (СКЯЕ).

Велика кількість методів обробки інформаційних сигналів використовується для визначення показників якості електричної енергії. Так одним із найбільш поширених є, так званий, метод середньо-квадратичних значень на основі апроксимації кривої вхідного сигналу спеціальною функцією, яка забезпечує задовільну апроксимацію амплітуди основної частоти електричної мережі. Найбільш широко використовуваним апаратом для аналізу параметрів якості електричної енергії є швидке перетворення Фур'є, яке трансформує сигнал із часового простору у частотний його декомпозицією на декілька частотних компонентів. [2].

Основним завданням СКЯЕ є забезпечення контролю параметрів живлення на затискачах електроспоживачів технологічного обладнання за допомогою контролю осцилограм напруги змінного струму, значень напруги 380 / 220В і 28,5В, значень частоти і коефіцієнта несинусоїдальності напруги змінного струму. Зазначений контроль підтверджує те, що системи електропостачання забезпечують на затискачах споживачів задані параметри електроенергії, а також є необхідною умовою для однозначного визначення за мінімальний час причин відхилення значень параметрів якості електроенергії від заданих у разі їх виникнення, що вкрай важливо при виконанні пусків космічних апаратів з комерційних програм [3].

Крім того, СКЯЕ виконує:

-реєстрацію і відображення параметрів живлення електроспоживачів;

- контроль працездатності СЕП в цілому та їх складових частин з прив'язкою до системи єдиного часу;

- відображення стану автоматичних вимикачів, виконання операцій управління в режимі дистанційного і автоматичного управління;

- реєстрація і документування параметрів живлення електроспоживачів і працездатності СЕП в цілому та їх складових частин із забезпеченням збереження інформації не менше ніж за 10 хвилин до виникнення нештатної ситуації,

- управління обладнанням СЕП [4].

Структура СКЯЕ реалізована трьома базовими рівнями [5].

а) Перший рівень (польовий) - забезпечує прийом сигналів від датчиків технічних систем і датчиків контролю стану обладнання. Обсяг цієї інформації забезпечує відображення реальної картини технологічного процесу і стану обладнання. Рівень складається з розміщених в шафах і щитах СЕП груп датчиків, контролерів вводу аналогових сигналів, промислових контролерів, перетворювачів напруги.

б) Другий рівень реалізовує виконання рішень по автоматизації технологічного процесу технічних систем. Рівень реалізований на програмованих логічних контролерах (ПЛК), які обробляють сигнали, що надходять від контролерів локальних пристроїв, датчиків, здійснюючи контроль технологічних параметрів технічних систем і контроль стану обладнання. Апаратура другого рівня встановлена у складових частинах СКЯЕ (щитах і шафах).

в) Третій ієрархічний рівень - це рівень діалогу оператор - система управління (рівень управління і спостереження).На цьому рівні оператори мають доступ до інформації, що дозволяє здійснювати контроль і управління технологічними процесами технічних систем.

Для вирішення завдання комплексного підходу до питань якості електроенергії створено трирівневу структуру системи контролю якості електроенергії в системах електропостачання космодромів. Запропонована та створена СКЯУ здійснює контроль якості електроенергії, за допомогою загальноприйнятих методів контролю показників ЯЕ, з виведенням даних на екран оператора саме у реальному часі, веденням безперервного моніторингу з фіксацією та реєстрацією основних параметрів, а також оповіщенням оператора при виникненні нештатних ситуацій.

Список використаних джерел:

1. ДСТУ EN 50160:2023 (2023). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності, Київ, Мінекономрозвитку України, 27.
2. Володарський Є.Т. Система моніторингу якості електричної енергії в децентралізованих системах електропостачання. Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – №. 318 (69). – С. 10–18.
3. Stones J., Collinson A. Power quality. Power Engineering Journal. 2001. Vol. 15, no. 2. P. 58–64. URL: https://doi.org/10.1049/pe:20010201
4. Coleman P. Power Quality Monitoring , Electrical Engineering Handbook., 2007. – Mode of access: https://doi.org/10.1201/9781420009255.ch33
5. El Hajji M. The electromagnetic interferance caused by high voltage power lines along the electrical railway equipment. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). – 2020. – Vol. 10, no. 5. – P. 4581. https://doi.org/10.11591/ijece.v10i5.pp4581-4591

УДК 621-926

Шлапко Р.О., аспірант спеціальності 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Бородай В.А., к.т.н., доцент кафедри електропривода,
(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

МОДИФІКОВАНИЙ СПОСІБ ЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДУ СИСТЕМ ПІДКАЧКИ-ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ

Вступ. Аналіз системи водопостачання висотних будинків виявив, що централізовані магістральні помпи забезпечити вимоги ДБН В.2.5-64:2012 "Внутрішній водопровід та каналізація (Частина І. - Проектування) і (Частина ІІ. - Будівництво)" [1] щодо тиску у водопровідних системах вище сьомого поверху неспроможні. Крім того, зношеність міської водогінної інфраструктури допускає зниження якості питної води за показниками вмісту хімічних та біологічних домішок.

Другий не менш вагомий фактор раціональної роботи системи водопостачання багатоповерхових будинків – неможливість здійснювати прогноз продуктивності помп протягом доби. Зрозуміло, що за таких умов отримати енергоефективні режими роботи насосів підкачки-підготовки води досить складно.

Зазвичай у системах помпування питної води використовують асинхронний привід з примітивною системою керування, яка не відповідає сучасним вимогам з точки зору енергетичної ефективності, або із передовою перетворювальною технікою, яка за найкращих енергетичних характеристик має надлишковий функціонал, що робить їх не достатньо конкурентними в частині капітальної вартості.

Існують і інші технології отримання кращих енергетичних характеристик насосів підкачки за умови їх доступності з позиції базових витрат [2]. Суть способу полягає у культивації принципу миттєвої подачі в двигун такої кількості енергії, яка не перевищує необхідної аби подолати поточне навантаження. Поряд з цим, встановлено, що в системах такого типу використані не всі напрямки щодо підвищення енергетичної ефективності, а це відповідно відкриває додаткові можливості до енергоощадного управління.

Мета роботи – на основі отриманих попередніх наукових досліджень запропонувати оригінальний модифікований спосіб керування асинхронним приводом насосів підкачки-підготовки питної води, що дозволить задіяти раніше невикористані можливості управління за умови нескладності схемної реалізації та фінансової доступності кінцевого пристрою управління.

Основний текст.

За задумом попередня версія автомату ефективного керування [2],[3] передбачала алгоритм управління, за яким процес роботи приводу насосу забезпечує наступні режими: «плавний запуск» за початкової подачі повної напруги мережі живлення, «номінальний» за фіксованої номінальної напруги живлення, «ефективний» за зниження напруги та частоти вдвічі у порівнянні із попереднім випадком. Подальше вивчення технологічного процесу виявив можливість додаткових способів енергетичної ощадності протягом режиму «номінальний» та за зниження споживання питної води до мінімуму.

Модифікована версія системи автоматичного керування пропонує замість номінальної мережної напруги режиму «номінал» регулювання останньої за допомогою нелінійного регулятора (рис.1), який протягом сталого режиму роботи здійснює зміну напруги залежно від поточного значення навантаження. Щодо регулювання режиму «ефективний», який вмикається за навантаження нижче 60 % номінального то його потрібно доповнити режимом автоматичного вимикання приводу за зниження навантаження менше за 30 %, що дозволить додатково зберегти трубопроводи будівель від поривів.

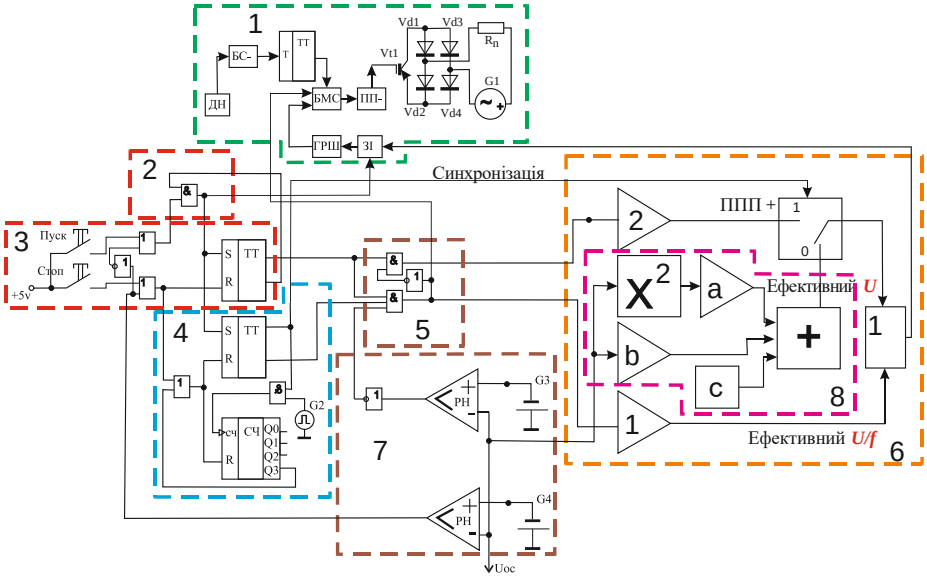


Рис.1 Функціональна схема реалізації модифікованого управління АД:
1 –блок синхронізації-модуляції і силовий; 2 – блокування повторного запуску та примусового скиду задавача інтенсивності; 3 -пост керування оператора; 4 – таймер системи плавного пуску; 5, 6 – система перемикання режимів; 7 – компаратори вмикання режиму «ефективний» та зупинка; 8 – нелінійний регулятор енергетичної ощадності режиму «номінал»

Цілком робота модифікованої системи повторює попередню версію автомату. Відмінною особливістю є отримання додаткового заощадження енергії за режиму «номінал» завдяки нелінійному регулятору, параметри якого дозволять отримати управління за принципом що задекларований в [2]. Режим примусової зупинки за навантаження нижче 30 % номіналу, забезпечується наявністю додаткового компаратора з іншою опорною напругою та додаткової системи примусового увімкнення-вимикання електромеханічної установки.

Висновки.

- Водопостачання будинків висотності вище сьомого поверху централізованими магістральними помпи забезпечити не можливо;
- Складність здійснити прогноз продуктивності помп протягом доби із-за хаотичного попиту питної води утруднює процес ефективного керування;
- Кращий спосіб енергоощадного управління - частотний перетворювач, капітальна вартість якого суттєво обмежує їх використання будь-яким пересічним споживачем;
- Більш глибоке вивчення проблеми виявило можливість додаткових способів підвищення енергетичної ощадності запропонованого автомату курування;
- Суть модифікації попередньої системи полягає у використанні нелінійного регулятора в режимі «номінал» і вимикання системи за зниження навантаження нижче 30 % номінального.

Перелік використаної літератури

1. ДБН В.2.5-64:2012 Внутрішній водопровід та каналізація. Частина І. Проектування. Частина ІІ. Будівництво. Зі Зміною № 1. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29848

2. Ковальов О.Р., Нестерова О.Ю., Бородай В.А. Автомат керування ефективністю асинхронного привода з функцією плавного пуску. *Microsyst Electron Acoust*, 2021, vol. 26, no. 2 DOI: 10.20535/2523-4455. mea.235881.

3. UA 151636 U Україна, МПК (2022) H02K 19/36. (Патент на корисну модель) Спосіб керування асинхронної машини / В.А. Бородай, О.Ю. Нестерова; заявник і патентовласник НТУ «Дніпровська політехніка»; Заяв. № u 2021 06874 від 02 грудня 2021 р.; опубл. Бюл №34 від 25.08.2022.

УДК 573.8

Григор'єв Є.О, асистент, кафедра електротехніки
Азюковський О.О., к.т.н., професор кафедри електропривода
(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЗАПОБІГАННЮ ПРОТІКАННЯ СТРУМІВ ВИРІВНЯННЯ НА ДІЛЯНЦІ ПІДЗЕМНОГО МЕТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ ЩО ПІД'ЄДНАНИЙ ДО ДВОХ СУМІЖНИХ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

Згідно з ДБН В.2.5–20:2018, газопроводами високого тиску I категорії вважаються ті, що мають робочий тиск газу від 0,6 МПа до 1,2 МПа; газопроводи високого тиску II категорії мають робочий тиск газу від 0,3 МПа до 0,6 МПа; газопроводи середнього тиску – від 0,005 МПа до 0,300 МПа; і газопроводи низького тиску – до 0,005 МПа, до яких під'єднуються житлові і громадські будівлі і дрібні комунально–побутові підприємства [1]. Разом з тим норми глибини прокладання під землею вимагають встановлення сталевих газопроводів не менше ніж 0.8 м вглиб, для поліетиленових – не менше ніж 1 м до верху труби, а під проїзними частинами доріг – не менше 1.2 м [2]. Для зниження тиску в мережу включають спеціальні газорегулювальні пункти та установки – тільки через них влаштовується зв'язок між газопроводами, у яких він різний.

Струм, як і його щільність, є основними величинами, що характеризують стан корозійних процесів у трубах. Щільність струму обумовлює швидкість корозійного процесу на певній ділянці. Газопроводом протікають струми стікання або натікання до грунту й струми вирівняння, які протікають самим сталевим підземним трубопроводом і обумовлюють корозійні процеси.

Для труб III категорії згідно з [3] стає видно, що збільшення діаметру трубопроводу зумовлює зменшення активного опору. Збільшення опору протікання струмів властиве для трубопроводів низького діаметру. Також на опір впливає і зростання частоти напруги. Для діапазону частот комутації ключів інвертора від 1000 Hz фаза повного опору починає змінюватися. Зміна величини індуктивної складової опору несе за собою фазовий зсув між струмом та напругою.

Електрохімічний захист трубопроводу, в системі якого останній виступає катодом – є найпоширенішим методом захисту підземних металевих споруд, який використовується з гальванотехніки [3], [4]. За гальванотехнічними принципами при використанні жертвенних анодів протікає реакція катодного відновлення металу з виділенням водню: $Me^{z+} + ze = Me^{0}$. У джерелах чітко звертається увага на те, що характер реакції, що називається гальваностегією, високою мірою залежить від різних факторів, як то: густини струму, температури перемішування електроліту тощо. Густина струму напряму впливає як на якість утворених осадів навколо катоду труби, так і на швидкість їх утворення.

Розгляд моделі (рис. 1), у якій відрізок труби прокладений у грунті з рівномірною характеристикою, та підключений до двох станцій електрохімічного захисту на відстані L, показує як позитивні так і негативні ефекти, формула кривої розподілу потенціалу згідно [5]:

$$E'_x = \frac{I * R_{пер}\alpha}{2} e^{-\alpha x}$$

де: I – сила струму СКЗ, А; α – стала розповсюдження, 1/м; $R_{пер}$ – перехідний опір, Ом.

Загально відомо, що до позитивних ефектів можна віднести виникнення натікаючих струмів – задля чого і робиться катодний захист, а труба слугує довше. З іншого боку виникають так звані струми вирівняння, що порушують процес захисту та псують як обладнання, так і саму трубу з ізоляцією. Треба відмітити, що в ідеалізованих випадках зони захисту кожної станції катодного захисту є однаковими, в той час як в реальних умовах

внаслідок впливу струмів що блукають, неоднаковості стану ізоляційного покриття, зони впливу однаковими бути не можуть.

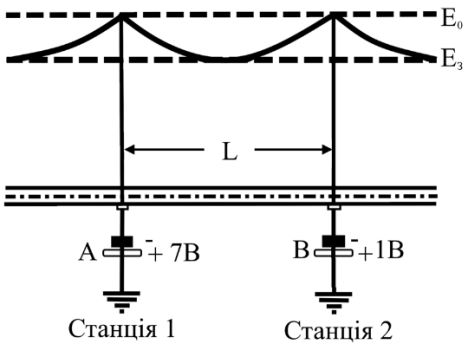


Рисунок 1. Схема підключення суміжних станцій катодного захисту з різними фазами до труби та розподіл їх потенціалів

У системах катодного захисту між станціями виникають транзитні перетоки потужності, зумовлені фазовим зсувом між векторами напруг, що спричиняє потенційну різницю до 1,7 В згідно з ДСТУ 4219–2003. Це ускладнює контроль струмів вирівняння, які порушують розподіл захисного потенціалу вздовж трубопроводу, сприяють прискоренню корозії в місцях пошкодженої ізоляції через винесення йонів металу, дестабілізують щільність захисного струму, спотворюють сигнали моніторингу та підвищують температуру труби, що особливо небезпечно при транспортуванні горючих речовин. Крім цього, такі струми значно ускладнюють функціонування релейного захисту.

Список використаних джерел:

1. ДБН В.2.520:2018. Видання. Газопостачання. [Чинний від 20190701]. Вид. офіц. Київ: Державне підприємство "Укрархбудінформ", 2019. 115 с.

2. Кодекс 2:2021. Видання. Газорозподільчі системи. Рекомендації щодо проектування, будівництва, контролювання за будівництвом, уведення та виведення з експлуатації газорозподільчих систем. [Чинний від 18.11.2021]. Вид. офіц. Київ: ДП "УкрНДНЦ", 2022. 92 С.

3. Beshta, A., Aziukovskyi, O., Balakhontsev, A., & Shestakov, A. (2017). Combined power electronic converter for simultaneous operation of several renewable energy sources. Proceedings of the International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017, pp. 236-239

4. Азюковський О.О. Зміна електротехнічних параметрів підземного металевого трубопроводу під впливом високочастотної складової напруги станцій катодного захисту. Електрифікація транспорту. 2015. №10. С. 98 – 107.

5. Кислова О.В., Макєєва І.С. Основи електрохімї: навч. посіб. Київ: КНУТД, 2017. 128 С.

УДК 621.316.925

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

ФІЛЬТРИ АКТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Формування високої якості електроенергії у промислових та комерційних електричних мережах є необхідною умовою стабільної роботи сучасного обладнання, підвищення енергоефективності та зниження експлуатаційних витрат. Одним із ефективних технічних засобів досягнення цього завдання є застосування фільтрів активної компенсації, які дозволяють усувати негативні наслідки спотворень електричної енергії без значних змін у структурі мережі.

Проблема погіршення якості електроенергії виникає переважно через появу гармонічних спотворень, викликаних роботою нелінійних навантажень. Частотні перетворювачі, імпульсні блоки живлення, світлодіодне освітлення, системи безперебійного живлення і багато іншого обладнання створюють значні рівні вищих гармонік у струмах і напругах мережі. Наявність гармонічних складових веде до зростання теплових втрат, погіршення коефіцієнта потужності, перегріву трансформаторів і кабельних ліній, неправильного функціонування релейного захисту та зниження строку служби електрообладнання.

У традиційній практиці боротьби з гармонічними спотвореннями застосовували пасивні фільтри, які налаштовувалися на поглинання гармонік певних порядків. Однак такі рішення виявилися недостатньо ефективними в умовах змінних режимів роботи і широкого спектру гармонічних складових. Саме тому активні фільтри гармонік стали оптимальним інструментом для забезпечення стабільної якості електроенергії.

Фільтри активної компенсації працюють за принципом динамічного генерування струму, що має форму, протилежну формі небажаних гармонічних складових. Таким чином, в точці підключення фільтра результуючий струм має майже синусоїдальну форму. Сучасні активні фільтри здатні працювати з широким спектром гармонік, коригувати спотворення в реальному часі та адаптуватися до змін навантаження. Це робить їх особливо ефективними в промислових мережах, де характер навантажень часто є нестабільним і непередбачуваним.

Окрім компенсації гармонік, активні фільтри можуть вирішувати й інші завдання покращення якості електроенергії. Вони здатні компенсувати реактивну потужність, коригувати незбалансованість фаз, зменшувати флікер і стабілізувати напругу. Комплексний підхід дозволяє одночасно вирішувати кілька проблем, пов'язаних із якістю живлення, що особливо важливо для технологічних процесів з високими вимогами до стабільності енергопостачання.

Технічна реалізація активних фільтрів базується на використанні силових електронних перетворювачів, систем управління вектором струму і алгоритмів швидкого аналізу гармонічного складу. Висока швидкодія і точність роботи забезпечуються застосуванням цифрових процесорів сигналів та спеціалізованого програмного забезпечення, яке дозволяє у реальному часі виявляти спотворення та формувати компенсуючі сигнали.

Ефективність застосування фільтрів активної компенсації підтверджується численними практичними прикладами. На підприємствах, де були встановлені такі системи, спостерігалося значне зниження рівня загального гармонічного спотворення (THD) як у струмі, так і у напрузі, підвищення коефіцієнта потужності до нормативних рівнів, зменшення частоти аварійних вимкнень обладнання та зниження витрат на електроенергію.

Економічна доцільність впровадження активних фільтрів визначається не лише безпосереднім ефектом від покращення якості електроенергії, а й довгостроковими вигодами у вигляді продовження строку служби обладнання, зменшення витрат на ремонт, оптимізації

енергоспоживання та підвищення стабільності виробничих процесів. Особливо це важливо для підприємств із критичними технологічними ланцюгами, де навіть незначні перебої у живленні можуть спричинити значні збитки.

Фільтри активної компенсації демонструють високу ефективність як у локальних рішеннях (наприклад, встановлення біля особливо важливого обладнання), так і у комплексних системах поліпшення якості електроенергії на рівні всього підприємства. Вибір оптимальної конфігурації активного фільтра залежить від характеру навантаження, спектру гармонік, потужності системи та економічних критеріїв проєкту.

Таким чином, застосування фільтрів активної компенсації є сучасним, технічно обґрунтованим і економічно вигідним рішенням для покращення якості електроенергії в промислових мережах. В умовах зростання вимог до енергетичної надійності та ефективності активні фільтри стають невід'ємною частиною стратегії управління якістю електропостачання і розвитку систем енергоменеджменту промислових об'єктів.

Перелік посилань

1. H. Ge, Y. Zhen, Y. Wang and D. Wang, "Research on LCL filter active damping strategy in active power filter system," *2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC)*, Kunming, China, 2017, pp. 476-481, doi: 10.1109/ICMIC.2017.8321691.
2. Zhiling Qiu, Enxing Yang and Jie Kong, "Current closed-loop control of shunt active power filter with LCL filter [J]", *Proceeding of the CSEE*, vol. 29, pp. 15-20, 2009.

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ ЯК ФАКТОР ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖАХ

У сучасних промислових мережах якість електроенергії є одним із ключових показників надійності та ефективності роботи електротехнічного обладнання. Під якістю електроенергії розуміють сукупність властивостей електричної енергії, які забезпечують нормальне функціонування приєднаних споживачів. Одним із найбільш серйозних чинників погіршення якості електроенергії є гармонічні спотворення. З розвитком електронних пристроїв, систем частотного регулювання, перетворювачів та іншого силового обладнання, кількість джерел гармонік постійно зростає. Це призводить до негативних наслідків як для електричних мереж, так і для виробничих процесів загалом. У цій доповіді ми розглянемо природу гармонічних спотворень, їх джерела, наслідки та можливі методи боротьби з ними.

Гармонічні спотворення виникають через появу в електричній мережі складових напруги або струму, частота яких є кратною основній частоті (50 або 60 Гц залежно від регіону). Ці складові можуть мати як синусоїдальну, так і складну форму, що суттєво змінює параметри електроенергії. Найбільш типові джерела гармонік у промислових мережах - це перетворювачі частоти, джерела безперебійного живлення (UPS), імпульсні джерела живлення, електродугові печі, зварювальне обладнання та деякі типи моторів із нерегульованим приводом.

Основним наслідком гармонічних спотворень є підвищення втрат енергії в мережах та обладнанні. Гармоніки спричиняють додатковий нагрів трансформаторів, двигунів, кабелів та інших елементів електричних систем. У трансформаторах це проявляється у вигляді збільшення втрат у сталі та міді, що знижує термін служби обладнання. Для електродвигунів наслідки ще серйозніші: появляється підвищена вібрація, шум, перегрів обмоток, що може призвести до їх передчасного виходу з ладу.

Ще одним важливим ефектом є неправильне спрацьовування релейного захисту. Багато реле налаштовані на синусоїдальний сигнал основної частоти, і присутність гармонік може спричинити хибні спрацювання або, навпаки, затримку захисту в аварійних ситуаціях. Це ставить під загрозу безпечну експлуатацію обладнання.

Крім того, гармоніки здатні призводити до резонансних явищ у мережі, що суттєво збільшує рівень напруги чи струму на певних частотах. Такий резонанс може зруйнувати ізоляцію кабелів або пошкодити конденсаторні батареї, які використовуються для компенсації реактивної потужності.

Існують різні методи боротьби з гармонічними спотвореннями. Найпростішим підходом є встановлення пасивних фільтрів - LC-ланцюгів, налаштованих на поглинання конкретних гармонік. Більш сучасним рішенням є застосування активних фільтрів, які в реальному часі генерують компенсаційний сигнал, нейтралізуючи небажані гармоніки. Крім того, на етапі проєктування систем рекомендується обирати обладнання з мінімальним рівнем гармонічних спотворень та планувати мережі таким чином, щоб уникати можливих резонансних явищ.

Не менш важливою є регулярна діагностика стану мережі. Використання аналізаторів якості електроенергії дозволяє виявити проблемні ділянки та вчасно вжити заходів для зменшення впливу гармонік.

Гармонічні спотворення є серйозним чинником погіршення якості електроенергії в промислових мережах. Вони спричиняють збільшення втрат енергії, передчасний знос обладнання, порушення роботи захисту та можливі аварійні ситуації. Умови сучасного виробництва вимагають серйозної уваги до контролю рівня гармонік та вживання заходів для

їх мінімізації. Застосування фільтрації, правильне проєктування мережі та регулярний моніторинг якості електроенергії є необхідними елементами стратегії підвищення ефективності та надійності електропостачання промислових об'єктів. Тільки комплексний підхід дозволить зменшити негативний вплив гармонічних спотворень та забезпечити стабільну роботу електротехнічних систем.

Перелік посилань

1. Bollen, Math HJ. *Understanding power quality problems*. Vol. 3. New York: IEEE press, 2000.
2. G. Anu and F. M. Fernandez, "Identification of Harmonic Injection and Distortion Power at Customer Location," *2020 19th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Dubai, United Arab Emirates, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICHQP46026.2020.9177869.

УДК 621.316.925

Ровенський О.О.
E-mail:rovenskyioleg7@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-0628-5188
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (Україна)

КОНТРОЛЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Стабільне та якісне електропостачання є одним із ключових чинників ефективної роботи промислових підприємств у сучасних умовах технічного прогресу та цифрової трансформації. Залежність критичного технологічного обладнання від стабільних параметрів електроенергії стрімко зростає, що робить забезпечення відповідного рівня якості електроенергії (Power Quality, PQ) стратегічно важливим завданням для інженерів, енергетиків та операторів мереж. В умовах зростання чутливості електроспоживачів до збурень, поширення високочастотної електроніки, широкого використання електроприводів та перетворювальної техніки, відхилення параметрів живлення навіть у межах кількох відсотків можуть спричинити суттєві наслідки - від збоїв у роботі автоматизованих ліній до пошкодження електроніки та аварійного простою виробництва.

Якість електроенергії визначається сукупністю параметрів, зокрема: стабільністю частоти та напруги, симетрією фаз, відсутністю провалів і перенапруг, низьким рівнем флікеру, гармонічних та міжгармонічних спотворень. Кожен із цих показників має нормативно визначені межі, недотримання яких може призвести до погіршення роботи обладнання, втрати енергоефективності та підвищення витрат на обслуговування. Особливо гостро питання PQ стоїть у таких галузях, як металургія, хімічна промисловість, мікроелектроніка, фармацевтика та інші сфери, де процеси є неперервними та вимагають високого рівня електротехнічної надійності.

Відповіддю на виклики сучасного енергоспоживання стало впровадження технологій постійного моніторингу PQ. Завдяки цифровим аналізаторам, що відповідають стандартам IEC 61000-4-30 [1], з'явилася можливість із високою точністю та частотою вимірювати параметри живлення у вузлових точках мережі та безпосередньо на відповідальних споживачах. Аналіз зібраних даних дозволяє не лише фіксувати відхилення, але й досліджувати їх динаміку, виявляти періодичність, джерела збурень та потенційні ризики. На основі статистичних показників, таких як SAIFI, SAIDI, рівні THD, флікер-індекси та ін., формуються рішення для корекції параметрів та підвищення загальної надійності мережі.

Окрім збору інформації, важливим завданням є її інтерпретація. Сучасні методи обробки сигналів - вейвлет-перетворення, коротке перетворення Фур'є, S-перетворення - у поєднанні з алгоритмами машинного навчання дозволяють в реальному часі класифікувати PQ-події та локалізовувати їх джерела. Застосування штучного інтелекту та нейронних мереж відкриває нові можливості для автоматичного виявлення характеру порушень, таких як провали напруги, імпульси, гармонічні спотворення, та для формування рекомендацій щодо відповідних заходів реагування.

Втім, одного лише контролю недостатньо для забезпечення належного рівня якості. Комплексна система управління PQ передбачає також реалізацію технічних рішень на різних рівнях: від компенсації реактивної потужності та гармонік до встановлення динамічних відновлювачів напруги, систем безперебійного живлення, стабілізаторів фази та мережевих регуляторів. Із розвитком концепції Smart Grid та мікромереж, дедалі більше функцій щодо підтримки якості передається на рівень локальних енергоактивних пристроїв - сонячних інверторів, електромобільних зарядних станцій, гібридних фільтрів тощо. Така децентралізована модель управління якістю дозволяє оперативно й ефективно реагувати на змінні навантаження та відхилення параметрів.

Отже, актуальність теми забезпечення якості електроенергії зумовлена як технічними,

так і економічними факторами. Підвищення якості електропостачання сприяє не лише зменшенню ризиків і витрат, але й підвищенню загальної енергоефективності підприємства, а також відповідності сучасним стандартам сталого розвитку. У цьому контексті дана стаття має на меті здійснити комплексний огляд підходів, методів і засобів контролю, аналізу та покращення якості електроенергії в мережах промислових підприємств, з урахуванням як класичних технічних рішень, так і новітніх інтелектуальних технологій.

Перелік посилань

1. IEC 61000-4-30:2015**.** *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.

UDC 621.311

Leonid Shevchuk – student of the Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine
ORCID: https://orcid.org/0009-0004-1369-7342

ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF RAILWAY LONGITUDINAL POWER LINES AT ELEVATED VOLTAGE LEVELS

In recent decades, the modernization of railway infrastructure has emerged as a critical direction in national strategies aimed at developing sustainable, high-capacity, and energy-efficient transportation systems. As railway electrification continues to expand globally, attention has shifted toward optimizing the performance and reliability of the power supply systems that feed electric traction networks. Longitudinal power supply lines, which deliver energy along the length of the rail track, are particularly significant in this context due to their widespread application in long-distance and high-speed railways.

The energy efficiency of these systems plays a crucial role in determining the operational cost, technical reliability, and maintenance demands of rail infrastructure. Among the numerous variables that affect the performance of longitudinal power supply lines, the level of operating voltage has a pronounced impact. This paper provides a comprehensive analysis of the advantages and implications of increasing voltage levels in railway longitudinal power supply networks, emphasizing how such upgrades can lead to substantial improvements in energy efficiency, power stability, and system durability.

Fundamentally, electrical losses in any power transmission system are influenced by the magnitude of current and the resistive characteristics of conductors. As power is transmitted over long distances to support electrified train operations, the current in the line contributes to resistive losses (I^2R losses), which result in heat and decreased efficiency. By elevating the operating voltage, the system requires a lower current to transmit the same amount of power, thereby significantly reducing the associated losses. This principle becomes especially relevant in scenarios involving high-speed and heavy-freight railway corridors, where energy demand is elevated and continuous.

Moreover, reducing the current has a range of cascading benefits. Components such as transformers, circuit breakers, overhead conductors, and other auxiliary equipment are subjected to lower thermal and electrical stress, thereby experiencing less wear and tear. This reduction in mechanical and thermal loading improves system longevity and reduces the frequency of maintenance interventions, which are often disruptive and costly in the context of railway operations. With voltage stability improved, trains receive more consistent power, which enhances traction performance and supports operational accuracy in automated control systems.

The study also investigates how elevated voltage levels can improve voltage profiles along extended lines. In conventional configurations, significant voltage drops can occur along lengthy sections of track due to line impedance. This leads to under-voltage conditions, especially during peak loads or when multiple trains operate simultaneously. By raising the baseline voltage, the system maintains healthier voltage margins throughout the network, reducing the likelihood of performance degradation or train delays caused by power quality issues.

A detailed simulation-based approach was used to model the energy flow in longitudinal supply systems under varying voltage conditions. Parameters such as line length, conductor material, resistance per kilometer, loading profiles, transformer losses, and substations' response were integrated into the model. The simulations revealed a consistent trend of reduced energy dissipation across the system with each increment in voltage. These efficiency gains become more significant as network complexity and load intensify, offering compelling evidence for scaling voltage upgrades across broader sections of the railway grid.

While the technical benefits are clear, the practical realization of elevated voltage systems involves multidimensional planning. Infrastructure designed for a specific voltage must undergo comprehensive evaluation before any voltage transition is implemented. This includes assessing insulation requirements, verifying clearances in substations and overhead catenary systems, updating

relay protection schemes, and ensuring compliance with railway safety standards. Each of these elements contributes to the overall cost and feasibility of such a project and must be carefully aligned with operational goals and available resources.

Furthermore, the integration of smart monitoring systems is indispensable when dealing with higher voltage networks. Modern supervisory control and data acquisition (SCADA) systems, combined with digital substations, provide the tools necessary to manage the increased complexity of voltage regulation. These platforms allow operators to dynamically monitor line performance, detect faults early, and optimize load balancing across sections in real time. This capacity is essential to prevent overloads, avoid unnecessary service interruptions, and ensure a balanced power flow during variable demand conditions.

An important aspect of the modernization process includes staff training and organizational readiness. Transitioning to higher voltage systems requires updated operational procedures, emergency response protocols, and technical documentation. Engineers, maintenance teams, and control room operators must be equipped with knowledge and skills relevant to elevated voltage management, including safety practices, equipment testing, and failure diagnostics. This human factor is often underestimated in technical planning but is crucial for the successful and sustainable implementation of any technological upgrade.

The long-term operational advantages of elevated voltage in longitudinal railway power lines also include greater flexibility in future expansion. As rail networks evolve to meet growing demand and increase throughput capacity, higher voltage systems offer improved scalability. They are better suited to accommodate additional trains, support higher axle loads, and integrate with modern traction units that often operate under strict power quality requirements. This makes elevated voltage systems not only a solution to current inefficiencies but a strategic investment in the adaptability of future railway infrastructure.

In conclusion, the elevation of operating voltage in longitudinal railway power supply systems presents a multifaceted opportunity to improve energy efficiency, reduce transmission losses, enhance system reliability, and prepare railway networks for future demands. Through a combination of engineering innovation, intelligent control technologies, and systemic planning, railway operators can achieve substantial operational and economic benefits. While the transition involves challenges related to infrastructure adaptation and regulatory compliance, the long-term returns in terms of technical and functional performance strongly support the case for voltage optimization in railway electrification.

REFERENCES

1. GOST 13109-97. *Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems.* Kyiv: State Committee for Standardization of Ukraine, 1999. – 32 p.

2. Ratner, M. P., & Mogilevsky, E. L. (1985). *Power Supply for Non-Traction Consumers of Railways*. Moscow: Transport Publishing House. – 295 p.

УДК 621.311

Циган Павло, доктор філософії, доцент кафедри електроенергетики
Погорілий Олександр, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
Макарчук Богдан, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Ретівов Ігор, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Жужома Дмитро, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ВДЕ В ПОТУЖНИХ ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Розвиток відновлюваної енергетики в Україні є важливим напрямом енергетичної політики, спрямованим на досягнення енергетичної незалежності, зниження екологічного впливу та збільшення частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в загальному енергобалансі. Особливу увагу привертає використання вітросонячних електростанцій (ВСЕС) у поєднанні з батарейними системами накопичення енергії (БСНЕ) у вузлах з високим навантаженням. Така інтеграція дозволяє підвищити ефективність роботи енергосистеми та забезпечити надійність електропостачання.

Потужні вузли навантаження енергосистеми, такі як великі промислові об’єкти, міста або регіональні розподільчі центри, характеризуються високим і нерівномірним споживанням електроенергії. Основні проблеми:

- Високий пік навантаження в години максимальної активності.
- Низька стабільність частоти та напруги в мережі через нерівномірне споживання.
- Значні витрати на транспортування електроенергії від віддалених генераторів.

Використання ВСЕС та БСНЕ у цих вузлах дозволяє частково або повністю вирішити ці проблеми.

Вітрові електростанції. Вітрові електростанції використовують кінетичну енергію вітру для генерації електроенергії. Основні переваги:

- Висока екологічність.
- Можливість встановлення в регіонах з високим рівнем вітрового потенціалу.
- Зменшення витрат на виробництво електроенергії у довгостроковій перспективі.

Сонячні електростанції. Сонячні електростанції перетворюють енергію сонячного випромінювання на електроенергію за допомогою фотогальванічних панелей. Переваги:

- Доступність у більшості регіонів України.
- Простота монтажу та обслуговування.
- Можливість встановлення на дахах будівель, фасадах або на спеціально відведених територіях.

БСНЕ забезпечують збереження електроенергії, виробленої ВСЕС, для подальшого використання в періоди підвищеного попиту чи нестачі генерації. Основні функції:

- Вирівнювання графіку навантаження.
- Забезпечення резервного живлення.
- Підтримка стабільності роботи енергосистеми.

Раціональні співвідношення потужностей. Для забезпечення стабільної роботи ВСЕС з БСНЕ в потужних вузлах навантаження оптимальним може бути наступне співвідношення (залежить від географічних умов конкретної території):

– Потужність сонячних станцій: 50-60 %.
– Потужність вітрових станцій: 30-40 %.
– Ємність акумуляторних систем: 30-50 % від сумарної встановленої потужності генерації.

Це дозволяє ефективно використовувати наявні ресурси та забезпечувати стабільність енергопостачання навіть в умовах пікових навантажень.

Основні принципи інтеграції ВСЕС і БСНЕ в потужних вузлах навантаження:

1. *Моделювання енергоспоживання:* аналіз добових, сезонних та річних графіків навантаження.
2. *Оцінка потенціалу ВДЕ:* врахування вітрового та сонячного потенціалу в регіоні.
3. *Оптимізація потужності:* підбір конфігурації ВСЕС і БСНЕ відповідно до потреб вузла.
4. *Автоматизація управління:* використання систем керування для моніторингу і регулювання генерації та накопичення енергії.

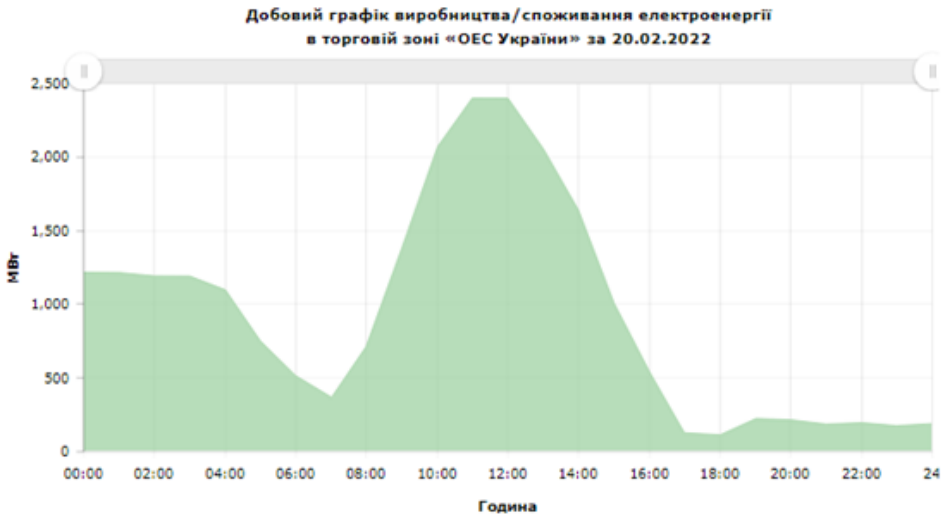


Рис. 1 – Приклад роботи незбалансованої вітросонячної генерації в енергосистемі України [6]

ВСЕС з БСНЕ можуть ефективно використовуватися для надання допоміжних послуг енергосистемі, зокрема:

1. Регулювання частоти і напруги в мережі.
2. Забезпечення оперативного резерву.
3. Балансування енергосистеми в умовах високої динаміки попиту та пропозиції.

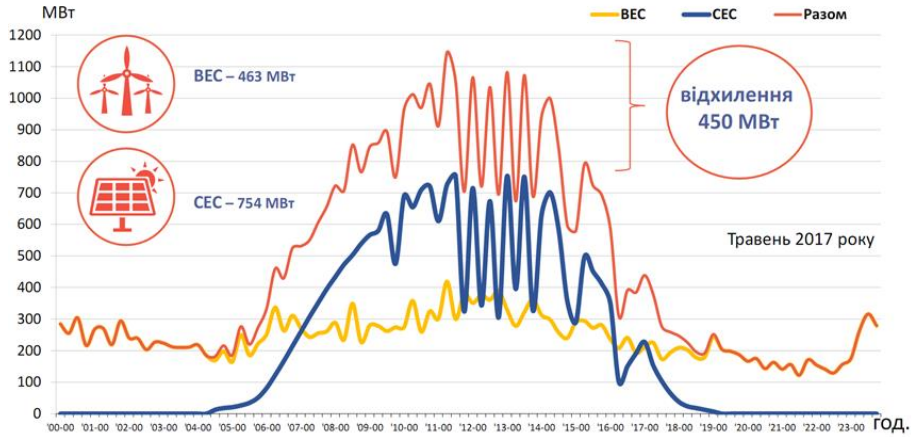


Рис. 2 – Волатильність «зеленої» генерації при співвідношенні СЕС/ВЕС 60/40 % без встановлення установок зберігання енергії [6]

Раціональні режими роботи ВСЕС і БСНЕ та оптимальні стратегії генерації.

- Режим денного піку: максимальне використання сонячної генерації у денний час.
- Нічний режим: використання енергії, накопиченої у БСНЕ, для покриття нічних навантажень.
- Гібридний режим: комбінування енергії з ВСЕС та традиційних джерел залежно від потреб.

Балансування енергії. Системи автоматичного регулювання дозволяють:

- Вирівнювати пікові навантаження.
- Зберігати надлишкову енергію для подальшого використання.
- Знижувати втрати енергії в мережі.

Аварійні режими роботи. БСНЕ можуть забезпечити енергопостачання у випадку:

- Відключення основного джерела живлення.
- Аварійних ситуацій у мережі.

Висновки. Сучасні умови розвитку систем розподіленої генерації, зниження вартості відповідних технологій, лібералізація ринків електричної енергії (Ринок допоміжних послуг, Ринок підтримки частоти тощо) відкривають нові можливості формування високоефективних інтелектуальних систем електрозабезпечення в контексті зеленого переходу. Застосування раціональних комбінацій вітросонячних систем генерації електричної енергії та установок зберігання енергії сприяє переходу систем ВДЕ до джерел гарантованої потужності, здатних нівелювати стохастичність погодних умов та забезпечити потрібні показники режимів роботи для підтримки стійкості енергосистеми. Раціональні комбінації джерел залежать від географічних умов, технічних особливостей споживання електроенергії споживачами конкретного вузла навантаження та ефективність прогнозування відповідних режимів. Від цього буде формуватися конкретна бізнес-модель та її технічна реалізація шляхом обґрунтування співвідношення параметрів джерел в гібридній системі.

Джерела та посилання

1. Li, Y., et al. "Optimal energy management in hybrid renewable energy systems." *Renewable Energy*, 2023.
2. Zhao, X., et al. "Battery storage applications in modern power grids." *Energy Storage Journal*, 2022.
3. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. "Розвиток ВДЕ в Україні", 2023. saee.gov.ua
4. Global Wind Energy Council. "GWEC Annual Report 2023." gwec.net
5. IRENA. "Renewable Power Generation Costs in 2022." irena.org
6. Dispatch information of “NEC “Ukrenergo” PJSC (2022). Retrieved from https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

СТАНДАРТИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ (IEC 61000, EN 50160, IEEE 519)

Якість електроенергії є важливою складовою надійної роботи електричних систем, особливо в умовах стрімкого розвитку промисловості, автоматизації та цифрових технологій. Параметри електроенергії повинні відповідати певним критеріям для забезпечення коректного функціонування електротехнічного та електронного обладнання. Відхилення від стандартних параметрів можуть призводити до збоїв у роботі пристроїв, втрат енергоефективності, пошкодження техніки та фінансових збитків. У відповідь на зростаючі вимоги щодо якості електроенергії були розроблені міжнародні стандарти, серед яких найбільше значення мають документи серії IEC 61000, стандарт EN 50160 та стандарт IEEE 519. Кожен із них має свої особливості підходу до оцінювання та регулювання параметрів якості електроенергії.

Серія стандартів IEC 61000 була розроблена Міжнародною електротехнічною комісією для регулювання питань електромагнітної сумісності. Вона охоплює широкий спектр аспектів, починаючи від опису методів вимірювання параметрів електромагнітних явищ до встановлення вимог щодо рівнів викидів і стійкості до завад. Особливо важливим для оцінки якості електроенергії є стандарт IEC 61000-4-30, який визначає методики вимірювання параметрів напруги, частоти, короткочасних відхилень, тривалих провалів та перенапруг. Цей стандарт встановлює єдині правила для вимірювання характеристик електропостачання, що дає можливість уніфікувати оцінку якості електроенергії в різних країнах та на різних об'єктах.

На відміну від серії IEC 61000, європейський стандарт EN 50160 фокусується на описі типових параметрів напруги у системах розподілу електроенергії. Цей стандарт регламентує, якою має бути напруга на точках підключення споживача до мережі загального користування. EN 50160 описує допустимі межі зміни частоти, симетрії напруги, швидких коливань напруги, наявності гармонічних складових, тривалих провалів та короткочасних перерв. Основною особливістю EN 50160 є те, що він не встановлює абсолютних норм якості, а визначає "типові" рівні та характеристики, яких мають дотримуватися постачальники електроенергії у більшості випадків. Таким чином, EN 50160 має певну гнучкість і відображає реальні умови функціонування розподільчих мереж у Європі.

Щодо стандарту IEEE 519, варто зазначити, що він має інший фокус у порівнянні з IEC 61000 та EN 50160. Розроблений Інститутом інженерів електротехніки та електроніки США, IEEE 519-2014 спеціалізується на контролі рівня гармонічних спотворень у мережах електропостачання. Основна мета цього стандарту – запобігти надмірному накопиченню гармонік у промислових та комерційних електричних системах. IEEE 519 встановлює допустимі межі для гармонічних спотворень як на стороні споживачів, так і на стороні енергокомпаній. Він також визначає допустимі рівні струмових гармонік для споживачів відповідно до рівня короткозамикальної потужності мережі в точці підключення. Особливу увагу приділено саме взаємодії між споживачем і мережею для запобігання взаємному погіршенню умов роботи.

Порівняльний аналіз трьох стандартів дозволяє чітко побачити їхні спільні риси та відмінності. Усі три стандарти спрямовані на покращення якості електроенергії, однак підходять до цього питання з різних боків. IEC 61000-4-30 надає базову методологію вимірювань, що є критично важливою для об'єктивної оцінки стану електроенергетичних систем. EN 50160 описує очікувані характеристики напруги на рівні споживача у реальних умовах експлуатації. IEEE 519 концентрується на обмеженні гармонічних спотворень, що є актуальним для середовищ із великою кількістю нелінійних навантажень.

Ще однією відмінністю є географічний масштаб застосування. IEC 61000 використовується як базовий міжнародний документ і приймається практично у всьому світі. EN 50160 є стандартом, прийнятим у межах Європейського Союзу. IEEE 519 застосовується переважно у Північній Америці, проте його принципи все частіше беруться до уваги й в інших регіонах, особливо там, де існує висока концентрація промислових споживачів електроенергії.

Ключовим у практиці оцінки якості електроенергії є правильна інтеграція вимог різних стандартів залежно від особливостей об'єкта. Наприклад, для міжнародних підприємств, що працюють одночасно в Європі та Північній Америці, важливо враховувати як вимоги EN 50160 щодо характеристик напруги, так і обмеження за IEEE 519 щодо вмісту гармонік. При цьому для об'єктивності вимірювань необхідно застосовувати методики, визначені IEC 61000-4-30 та суміжними документами серії IEC 61000.

Ще одним аспектом є застосування стандартів для проектування систем електропостачання та енергоменеджменту. Стандарти якості електроенергії є базою для технічних вимог до енергопостачальних компаній, постачальників обладнання і підрядників. Вони визначають правила взаємодії між виробниками електроенергії, операторами мереж, промисловими підприємствами і комерційними споживачами. Дотримання цих стандартів дозволяє підвищити надійність електропостачання, знизити кількість аварійних відключень, покращити показники енергоефективності та зменшити витрати на обслуговування обладнання.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що стандарти IEC 61000, EN 50160 та IEEE 519 є взаємодоповнюючими інструментами забезпечення якості електроенергії на різних рівнях електроенергетичної системи. Вони мають різну сферу застосування, проте їхнє спільне використання у комплексному підході до аналізу і покращення якості електроенергії дає можливість значно підвищити ефективність експлуатації електротехнічних систем. Знання вимог кожного із цих стандартів і вміння правильно їх застосовувати є важливою компетенцією для сучасних інженерів-енергетиків, проектантів і фахівців з енергоменеджменту. Сучасна промисловість вимагає високого рівня відповідності якості електроенергії технічним нормам, і саме дотримання стандартів стає основою для розвитку надійних і стійких енергетичних систем у глобальному масштабі.

Перелік посилань

1. IEC. *Electromagnetic compatibility (EMC) – IEC 61000 series*. International Electrotechnical Commission, 1995–2023. [Online]. Available: https://www.iec.ch/iec-61000
2. CENELEC. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems (EN 50160)*. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010. [Online]. Available: https://www.cenelec.eu
3. IEEE. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014)*. IEEE Standards Association, 2014. [Online]. Available: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710

УДК 621.311

Луценко Марія, аспірантка спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Кошеленко Анна, аспірантка спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Запишний Олександр, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Власенко Григорій, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Смирнов Юрій, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Замкова Ольга, аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ОСНОВНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУР СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Сучасні заклади освіти вимагають надійного та ефективного електрозабезпечення для забезпечення навчального процесу, досліджень і комфорту студентів та персоналу. З огляду на глобальні виклики у сфері енергетики та екології, зростає інтерес до впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у системи електрозабезпечення освітніх закладів. Цей підхід дозволяє зменшити залежність від викопного палива, скоротити викиди парникових газів і знизити витрати на електроенергію.

За останні п'ять років частка закладів освіти, які впровадили гібридні системи електрозабезпечення, зросла з 5% до 20%. Основний акцент робиться на інтеграцію сонячних панелей та акумуляторних систем. За прогнозами, до 2030 року цей показник може досягти 50% завдяки державним програмам підтримки та зниженню вартості обладнання. Згідно зі звітом Держенергоефективності України, кожна впроваджена система дозволяє зекономити до 30% на енергоспоживанні.

Відновлювані джерела енергії: основні типи та їх застосування. Сонячна енергія. Сонячні панелі (фотовольтаїчні системи) є одним із найпоширеніших способів використання відновлюваних джерел енергії в закладах освіти. Вони можуть бути встановлені на дахах будівель, фасадах або на спеціально відведених територіях. Переваги:

- *Екологічність:* мінімальні викиди CO2.
- *Економія*: зниження витрат на електроенергію у довгостроковій перспективі.
- *Освітній потенціал:* можливість використання системи для навчання студентів у галузі екології та енергетики.

Системи акумулювання енергії. Системи акумулювання є важливим компонентом сучасних систем електрозабезпечення. Вони дозволяють зберігати надлишкову енергію, вироблену сонячними панелями, для використання в періоди підвищеного попиту чи відсутності генерації. Переваги:

- Забезпечення безперебійного електропостачання.
- Підвищення енергетичної автономності.
- Зменшення навантаження на електромережу.

Резервування за допомогою генераторів. Генератори забезпечують додатковий рівень надійності системи електрозабезпечення, особливо під час аварій чи тривалих перерв у постачанні електроенергії. Вони можуть працювати на традиційних видах палива або бути інтегрованими з екологічно чистими джерелами.

Принципи побудови раціональної системи електрозабезпечення. Оцінка енергетичних потреб. Перед проєктуванням системи необхідно провести детальний аналіз енергоспоживання закладу, включаючи:

- Загальне річне споживання електроенергії.
- Пікові навантаження.
- Особливості роботи у різні сезони.

Оптимальна структура системи електрозабезпечення передбачає комбінування кількох джерел енергії. Наприклад:

- сонячні панелі для денного електрозабезпечення;
- Акумуляторні системи для зберігання енергії;
- геліоколекторні системи для опалення та гарячого водопостачання;
- резервні генератори або підключення до мережі для пікових навантажень;

Використання енергоефективних технологій. Освітлення, опалення, вентиляція та кондиціювання повітря мають бути максимально енергоефективними. Використання світлодіодного освітлення, розумних систем керування енергією та ізоляційних матеріалів суттєво знижує енерговитрати.

Практичні аспекти впровадження. Економічна доцільність. Хоча початкові інвестиції у ВДЕ можуть бути значними, їх окупність забезпечується зниженням витрат на електроенергію. Для розрахунку доцільності використовуються показники:

- термін окупності;
- чиста приведена вартість (NPV);
- внутрішня норма рентабельності (IRR).

При існуючій тарифікації для юридичних споживачів другого класу напруги окупність впровадження систем ВДЕ складає від 3-4 років при використанні лише фотоелектричних станцій до 6-8 років при передбаченні використання систем накопичення електроенергії в гібридних системах. Гібридні станції мають основною перевагою надійність електрозабезпечення, а прискорення окупності відповідних проєктів можливі за умови роботи з ринком електричної енергії та/або налаштування гібридної структури під цілодобове забезпечення електроенергією споживача з можливим використанням акумуляторних батарей у якості конвертерів вартісних показників відповідно до системи тарифікації (заряджання по нічному тарифу, тощо).

Юридичні та регуляторні аспекти. Для впровадження систем із ВДЕ необхідно враховувати чинне законодавство, норми енергоефективності та екологічні стандарти. У багатьох країнах існують програми підтримки, гранти або податкові пільги для проєктів у сфері ВДЕ.

Моніторинг і обслуговування. Системи електрозабезпечення повинні мати інструменти для моніторингу продуктивності та автоматичного виявлення несправностей. Регулярне технічне обслуговування є ключем до тривалої та ефективної роботи.

На рисунку 1 наведено режим роботи фотоелектричної станції закладу освіти, оснащеного системою децентралізованого електрозабезпечення, а на рисунку 2 - режим продовження комбінованого живлення споживачів при двох блекаутах цього ж дня.

Для закладів освіти та аналогічних за режимом роботи юридичних осіб встановлення гібридних систем електрозабезпечення є завжди ефективним заходом, оскільки режим роботи таких споживачів співпадає з режимом сонячної активності. До 2022 року, з урахуванням профіциту традиційних генеруючих потужностей не було необхідності гібридизації фотоелектричних станцій за допомогою додавання до них систем накопичення електричної енергії. Проте, в Україні, з урахуванням руйнування енергетичної інфраструктури внаслідок військової агресії такі системи є необхідними для резервування живлення споживачів при відключеннях і можливості використання сонячної енергії, а також на системному рівні – для підтримки роботи енергосистеми шляхом участі установок зберігання енергії у сегментах ринку допоміжних послуг та підтримки частоти.

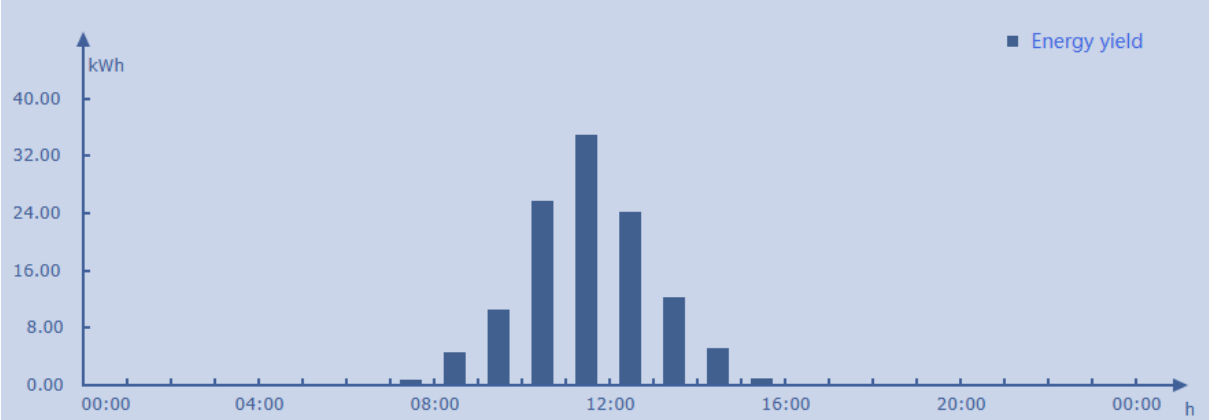


Рис. 1 – Режим роботи фотоелектричної станції муніципального споживача з системою децентралізованого електрозабезпечення «сонце-система накопичення»

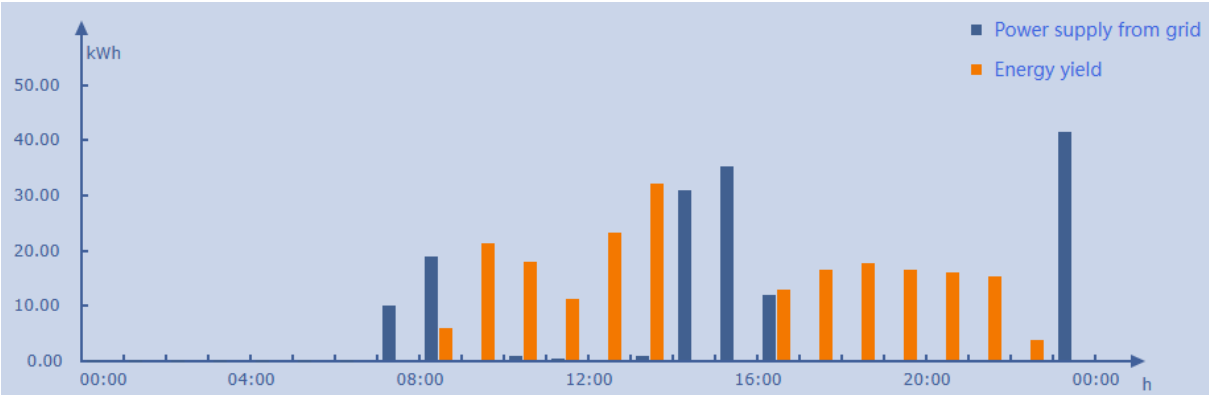


Рис. 2 – Режим роботи системи децентралізованого електрозабезпечення муніципального споживача зі збереженням живлення при двох блекаутах протягом дня.

Висновки. Раціональні системи електрозабезпечення муніципальних обєктів з використанням ВДЕ є ефективним інструментом для зниження екологічного впливу та підвищення енергетичної ефективності. Інтеграція сонячних панелей, систем акумулювання енергії та резервних генераторів дозволяє створити стійкі системи, що відповідають сучасним потребам суспільства та сприяють розвитку екологічної свідомості. Використання децентралізованих систем електрозабезпечення у комбінації з енергоефективними рішеннями щодо систем низькопотенційного відбору тепла (теплові насоси, геліоколекторні системи) для опалення приміщень, а також врахування особливостей огороджуючих конструкцій нових будівель та термомодернізація наявного житлового і соціального фонду сприятимуть досягненню кліматичної нейтральності споживачів, підвищенню енергоефективності режимів систем електрозабезпечення обєктів від централізованої енергосистеми.

Перелік посилань

1. Держенергоефективність України - офіційний сайт із програмами підтримки енергоефективності.
2. IEA Renewables - звіти та аналітика щодо розвитку ВДЕ.
3. Solar Power Europe - дані щодо впровадження сонячних технологій.
4. IRENA - ресурси Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики.

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

ПРИЧИНИ ТА НАСЛІДКИ ПРОСАДОК НАПРУГИ В ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖАХ

Просадки напруги в промислових мережах є одним із найпоширеніших видів порушень якості електроенергії, які мають вагомий вплив на стабільність роботи електротехнічних систем та економічні результати діяльності підприємств. Під просадкою напруги зазвичай розуміють короткочасне зниження ефективного значення напруги у межах від 10% до 90% від номінального рівня, тривалістю від однієї до кількох сотень мілісекунд, іноді до кількох секунд. Частота виникнення просадок, їхня тривалість та амплітуда безпосередньо залежать як від внутрішніх умов роботи мережі підприємства, так і від параметрів зовнішнього електропостачання.

Однією з головних причин появи просадок напруги є пуск потужних асинхронних двигунів, особливо тих, що не обладнані системами плавного пуску. Пусковий струм таких двигунів може у кілька разів перевищувати номінальний, що миттєво створює значне падіння напруги в місцевій мережі і, у залежності від конфігурації електричної системи, навіть у сусідніх зонах споживання. Наявність одночасного запуску кількох великих споживачів ще більше ускладнює ситуацію, викликаючи глибокі і затяжні просадки. Ці явища особливо критичні в системах із недостатньою короткозамикальною потужністю, де електромережа не здатна ефективно компенсувати такі струмові імпульси.

Ще однією розповсюдженою причиною є короткі замикання в мережах, навіть якщо вони мають перехідний характер або швидко ліквідуються засобами автоматичного відключення. Під час короткого замикання відбувається різке зростання струму, що супроводжується падінням напруги в широкій області електричної мережі. Наслідки таких подій залежать від відстані до місця аварії, структури системи та режиму її роботи. Варто відзначити, що навіть короткочасне коротке замикання, яке тривало долі секунди, може викликати просадку, здатну вивести з ладу чутливе обладнання.

Зміни в навантаженні також часто призводять до просадок напруги. Раптове підключення потужного споживача або різке зростання споживання активної чи реактивної потужності у промисловій системі змінює баланс у мережі, що виявляється зниженням рівня напруги. Особливо це характерно для підприємств із великою кількістю електротермічного обладнання, де включення печей або нагрівачів веде до стрибкоподібного зростання навантаження.

Аварійні ситуації, пов'язані з виходом з ладу елементів електромережі, наприклад, пошкодження трансформаторів, кабельних ліній або автоматичних вимикачів, також можуть викликати значні просадки напруги. Такі випадки зазвичай супроводжуються більш глибокими і довготривалими порушеннями параметрів електроенергії.

Наслідки просадок напруги є різноманітними за своєю природою та мають як прямий, так і опосередкований характер. Прямий вплив полягає у порушенні роботи електронних пристроїв, комп'ютерної техніки, систем автоматизації та контролю, які вимагають стабільної напруги для підтримки нормальної роботи. Навіть короткочасні зниження напруги можуть спричинити перезавантаження пристроїв, зупинку технологічних процесів, втрату даних у комп’ютерних системах, збій алгоритмів управління.

Промислове обладнання, таке як системи вентиляції, компресори, насоси, що працюють у безперервному режимі, також вразливі до просадок напруги. У разі зниження напруги можливе спрацьовування захистів від перенавантаження, перехід пристроїв у аварійний режим або їхнє пошкодження через втрату стабільності обертання.

Косвені наслідки просадок напруги виявляються через збільшення втрат продуктивності виробництва, підвищення кількості відходів, збільшення витрат на технічне

обслуговування та ремонт обладнання. Особливо серйозними можуть бути наслідки в галузях з безперервним технологічним процесом, де навіть коротка зупинка може вимагати тривалого часу на перезапуск і стабілізацію параметрів.

З технічної точки зору, повторювані просадки напруги сприяють передчасному зносу електрообладнання. Зокрема, часті короткочасні зниження напруги створюють додаткові термічні та механічні навантаження на двигуни, блоки живлення і системи електронного керування. У довгостроковій перспективі це знижує надійність обладнання і прискорює його моральне старіння.

З огляду на потенційно серйозні наслідки просадок напруги, на підприємствах впроваджуються заходи для їхньої профілактики та мінімізації. Одним із найбільш ефективних способів є застосування пристроїв плавного пуску та частотних перетворювачів для електродвигунів, що дозволяють обмежити пускові струми. Системи компенсації реактивної потужності допомагають стабілізувати рівень напруги при змінних навантаженнях. Джерела безперебійного живлення критичних систем забезпечують підтримку функціональності електроніки під час короткочасних порушень напруги.

Не менш важливим є планування архітектури електричних мереж із урахуванням можливих аварійних режимів. Проєктування із забезпеченням достатнього резервування потужності, застосування автоматичних перемикачів на резервні джерела живлення, правильний вибір розмірів трансформаторів і секціонування мереж – усе це сприяє підвищенню стійкості системи до просадок.

Для систематичної оцінки рівня проблеми необхідно впроваджувати системи моніторингу якості електроенергії, здатні реєструвати короткочасні події та накопичувати статистику. На основі аналізу даних можна визначити типові сценарії виникнення просадок, оцінити їхню глибину, тривалість і частоту, що дозволяє виявити найуразливіші місця електроенергетичної системи об'єкта і розробити обґрунтовані рішення щодо їх покращення.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що причини просадок напруги мають багатофакторний характер і можуть бути пов'язані як із внутрішніми характеристиками підприємств, так і з зовнішніми впливами. Наслідки цих явищ торкаються не лише технічного стану обладнання, а й безпосередньо впливають на економічні показники виробництва. Тому мінімізація частоти і тривалості просадок напруги є важливою складовою загальної стратегії підвищення надійності електропостачання і ефективності промислових підприємств.

Перелік посилань

4. Кононов Б. Т. Управління якістю електричної енергії [Електронний ресурс] / Б. Т. Кононов, Н. М. Рябуха, В. М. Щека // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних сил. – 2013. – Вип. 3. – 158-161 с. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ZKhUPS_2013_3_37
5. Monteiro Pereira R. M. FACTS performance in the dynamic voltage stability of an electric power system / R. M. Monteiro Pereira, Adelino J. C. Pereira, C. M. Machado Ferreira, F. P. Maciel Barbosa // 52nd International Universities Power Engineering Conference. – 2017. – Pp. 1-5.
6. Бунько В. Я. Аналіз електромагнітної сумісності системи "мережа-активний фільтр гармонік", яка впливає на якість електричної енергії [Електронний ресурс] / В. Я. Бунько // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія : Технік ка та енергетика АПК. – 2015. – Вип. 209(1). – 105-112 с. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/geta_2015_94_7.

УДК 621.316.92

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

В умовах сучасної промисловості якість електроенергії є критичним чинником, що визначає надійність роботи обладнання, ефективність виробничих процесів та економічну доцільність експлуатації енергетичних систем. Одним із найбільш значущих факторів, що впливають на якість електроенергії, є присутність вищих гармонік у промислових електричних мережах. Гармоніки виникають у результаті нелінійних процесів, що відбуваються при взаємодії електричного струму та напруги з різними елементами системи, і становлять серйозну загрозу для стабільності та довговічності роботи електротехнічного обладнання.

Вищі гармоніки – це складові електричного сигналу, частота яких є кратною основній частоті мережі (50 або 60 Гц). Нелінійні навантаження, такі як частотні перетворювачі, імпульсні джерела живлення, електропечі, зварювальне обладнання, системи освітлення на основі світлодіодних технологій, активно генерують гармонічні спотворення. Присутність вищих гармонік змінює форму синусоїдальної хвилі струму і напруги, призводячи до небажаних фізичних та економічних наслідків.

Одним із основних негативних ефектів вищих гармонік є підвищення втрат енергії в елементах системи електропостачання. Гармонічні струми створюють додаткове нагрівання кабельних ліній, трансформаторів і електродвигунів через збільшення ефективного опору провідників на вищих частотах. Відповідно, зростає споживання електроенергії без виконання корисної роботи, що веде до зниження енергоефективності підприємства.

Ще одним серйозним наслідком є вплив гармонік на роботу захисного обладнання. Багато типів пристроїв захисту, таких як автоматичні вимикачі та релейні схеми, розраховані на роботу із чисто синусоїдальним струмом. Присутність гармонік може призвести до некоректної роботи таких пристроїв, зменшення їх чутливості або, навпаки, до хибних спрацьовувань, що збільшує ризик аварійних ситуацій у промислових мережах.

Вищі гармоніки також мають негативний вплив на роботу електродвигунів, спричиняючи перегрів обмоток, зниження крутного моменту та підвищення рівня вібрацій. У довгостроковій перспективі це призводить до скорочення терміну служби машин, збільшення витрат на ремонт і технічне обслуговування. Особливо критичною є ситуація для двигунів, що працюють у безперервних виробничих процесах, де їхня надійність є запорукою стабільності всього виробництва.

Присутність гармонік також впливає на точність роботи контрольно-вимірювальних приладів, які можуть некоректно визначати параметри електричних процесів за умов високого рівня спотворення сигналу. Це ускладнює моніторинг енергетичних показників та прийняття обґрунтованих рішень щодо енергоменеджменту підприємства.

Для оцінки рівня гармонічних спотворень застосовується показник Total Harmonic Distortion (THD) – повний коефіцієнт гармонічних спотворень, який визначає відносний внесок гармонік у загальну форму сигналу напруги або струму. Нормативні документи, такі як IEEE 519-2014 та IEC 61000-4-7, встановлюють допустимі межі THD для різних типів мереж і навантажень, орієнтуючи підприємства на необхідність контролю цього параметра.

У відповідь на загрозу з боку гармонічних спотворень у промислових електричних мережах застосовується низка технічних рішень. Одним із найефективніших є встановлення активних та пасивних фільтрів гармонік, які знижують рівень небажаних частотних складових і відновлюють близьку до синусоїдальної форму струму та напруги. Активні фільтри мають здатність адаптуватися до змін навантаження в реальному часі, що робить їх особливо ефективними у динамічних виробничих середовищах.

Додатковим заходом є правильне проектування електричних мереж з урахуванням мінімізації впливу нелінійних навантажень, використання технологій розподілу навантаження по фазах та оптимізація підключення потужних споживачів. Важливо також постійно моніторити параметри якості електроенергії, щоб оперативно виявляти перевищення допустимого рівня гармонік і своєчасно вживати заходів для усунення порушень.

Таким чином, вплив вищих гармонік на якість електроенергії в промислових електричних мережах є комплексною проблемою, що вимагає системного підходу до її виявлення та нейтралізації. Застосування сучасних засобів аналізу, фільтрації та оптимізації дозволяє значно підвищити енергоефективність підприємства, забезпечити довговічність обладнання та підвищити надійність виробничих процесів у конкурентному середовищі сучасної промисловості.

Перелік посилань

1. IEEE Standards Association. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014).* IEEE, 2014. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
2. I. Gueye, A. Kebe and M. Diop, "Design of a Domestic Controlled Voltage Stabilizer," *2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Middlesbrough, United Kingdom, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548231.D. Thomas, K. J. Mathews, L. Thomas, G. S. Babu and S. Saji Kurian, "Automatic Voltage Stabilizer using a PWM controlled AC-AC converter topology," *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, Kannur, India, 2022, pp. 51-58, doi: 10.1109/ICICICT54557.2022.9917668.

УДК 621.313

Атабаєв А.Н. студент гр. МЕПС-21 1/9
Хоменко В.І., к.т.н., викладач електротехнічних дисциплін
(Придніпровський металургійний фаховий коледж, м. Кам'янське, Україна)

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В КОМБІНОВАНОМУ ВИРОБНИЦТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА РАХУНОК ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

Вступ. На сучасному етапі розвитку електроенергетики гостро стоять питання з мінімізації викидів забруднюючих речовин в навколишнє природне середовище. Саме впровадження зеленої енергетики стало ключовим аспектом з проєктування комбінованої електростанції на базі відновлювальних джерел енергії. Сучасні досягнення та перспективи розвитку енергозберігаючих технологій, методи економії теплової і електричної енергії є *актуальним і стратегічним питанням* в сучасних реаліях світу, а в умовах воєнного стану в Україні тим більше. Потенціал використання відновлюваних джерел електроенергії в Україні один із основних факторів захисту навколишнього середовища та економічного розвитку країни [1].

Постановка задачі. Аналіз ефективності використання відновлювальних джерел електроенергії в енергосистемі та в умовах освітнього процесу.

Об'єкт дослідження – проєктування пристрою гібридного (комбінованого) виробництва електроенергії за рахунок відновлювальних джерел енергії.

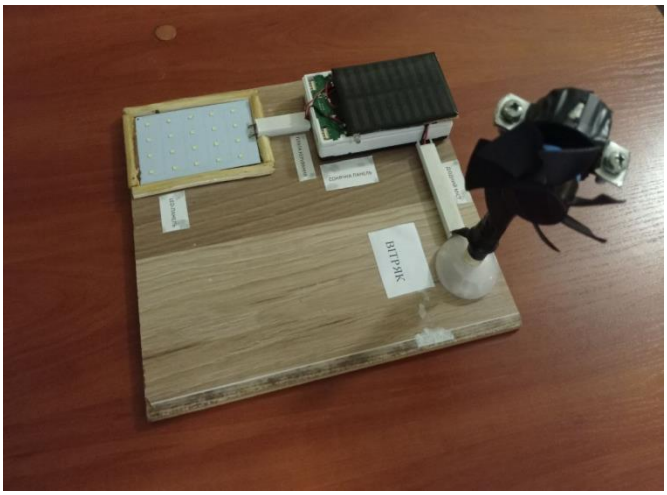
Предмет дослідження – ефективність отримання та передачі електроенергії за рахунок сонячної та вітрової електроенергії з застосуванням LED-ламп.

Результати досліджень. Сонячно-вітрова енергетика є перспективним напрямком у використанні відновлюваних джерел енергії. Вона поєднує дві найпоширеніші технології – сонячні панелі та вітрові турбіни, що дозволяє забезпечити стабільніше та ефективніше виробництво електроенергії, використовуючи природні ресурси максимально ефективно.

Переваги комбінованої системи

1. Стабільність виробництва:
   - Сонячні панелі генерують електроенергію вдень, коли світить сонце.
   - Вітрові турбіни можуть працювати цілодобово, за наявності вітру.
2. Ефективність: комбінація двох джерел енергії дозволяє забезпечити безперебійне живлення, оскільки у випадку недостатнього сонячного світла може використовуватися енергія вітру.
3. Оптимальне використання ресурсів: використання як сонця, так і вітру дозволяє максимально ефективно використовувати доступні природні ресурси, що знижує навантаження на окремі джерела.

За результатами обґрунтування ефективності використання комбінованих джерел відновлювальної енергії зпроєктовано діючий макет гібридної установки в поєднанні сонячної та вітрової установок. Даний проєкт має перспективне спрямування в рамках стратегії енергетичної незалежності України, як в мирний час, а особливо в умовах війни. Зовнішній вигляд гібридної установки наведено на рисунку 1.



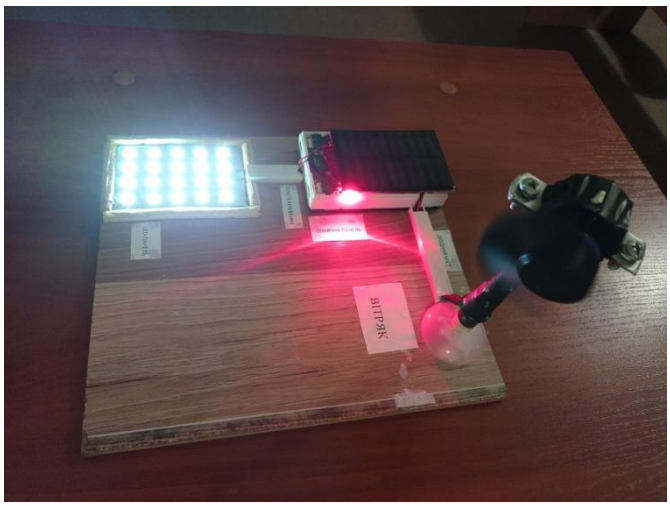


Рисунок 1 – Практичне дослідження системи гібридного виробництва електроенергії

Висновки. Сонячно-вітрова енергетика є ключовим напрямком у переході до відновлюваних джерел енергії. Комбіновані системи, які використовують як сонячні панелі, так і вітрові турбіни, мають значні переваги в стабільності та ефективності виробництва електроенергії. Це дозволяє зменшити залежність від традиційних енергоносіїв і сприяє екологічно чистому та сталому енергозабезпеченню.

Список використаних джерел

1. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: навч. посібник / М. С. Сегеда, М. Й. Олійник, О. Б. Дудурич. – Львів: Видавництво львівської політехніки, 2019. – 204 с.
2. Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі: Навч. посіб. / Д. Л. Дюдюк, С. С Мазепа, Я. М. Гнатишин. – Львів: «Магнолія 2006», 2023. – 188 с.

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ І СПОТВОРЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОБ'ЄКТІ СПОЖИВАЧА

Ідентифікація джерел гармонічних спотворень і спотвореної потужності на об'єкті споживача є однією з найважливіших задач сучасного енергетичного аудиту промислових підприємств. З огляду на постійне зростання кількості нелінійних навантажень у виробничих мережах, аналіз походження гармонічних складових та їхнього впливу на якість електроенергії набуває критичного значення для забезпечення стабільності технологічних процесів і зниження енергетичних втрат.

Нелінійні навантаження, серед яких особливо варто виділити перетворювачі частоти, імпульсні блоки живлення, електродугові печі та зварювальні апарати, формують струми із спотвореною формою. Ці струми містять у собі не тільки основну складову на частоті 50 Гц, а й вищі гармоніки, кратні основній частоті. Внаслідок циркуляції таких струмів у мережі відбувається викривлення форми напруги, що негативно впливає на роботу обладнання, спричиняє додаткові теплові втрати, погіршує енергетичну ефективність підприємства та створює електромагнітні завади.

Для встановлення конкретних джерел гармонічних спотворень застосовуються аналізатори якості електроенергії, які дають змогу вимірювати рівні загального гармонічного спотворення напруги і струму, будувати спектр гармонічних складових та визначати їхній напрямок руху у мережі. Аналіз проводиться на основі безперервного моніторингу параметрів електроенергії у критичних точках енергосистеми: на вводі об'єкта, у розподільних шафах, на секційних шинах, а також безпосередньо на клемах великих споживачів. Порівняння спектральних характеристик дозволяє виявити пристрої або групи пристроїв, що є основними генераторами гармонік.

Одним із ефективних практичних підходів до виявлення джерел спотворень є метод аналізу напрямку потоку гармонічних струмів. Якщо при вимірюваннях фіксується, що гармонічні складові поширюються у напрямку від конкретного обладнання до джерел живлення, це свідчить про те, що дане обладнання генерує спотворення. Додатково для підтвердження результатів застосовуються методи локального відключення або навмисної ін’єкції контрольних сигналів із подальшим аналізом змін у спектрі гармонік.

Важливим аспектом аналізу є також визначення рівня спотвореної потужності, яка представляє собою компоненту повної потужності, не придатну до виконання корисної роботи. Спотворена потужність виникає внаслідок наявності вищих гармонік і викликає додаткові навантаження на систему електропостачання. Обчислення здійснюється на основі векторного аналізу складових повної потужності: активної, реактивної та гармонійної. Надмірна величина спотвореної потужності призводить до перевантаження джерел живлення, трансформаторів, кабельних ліній і генераторів.

З практичної точки зору, правильна ідентифікація джерел гармонічних спотворень дозволяє розробити цілеспрямовані заходи з їхнього обмеження. Це може бути застосування пасивних фільтрів, що налаштовані на компенсацію певних гармонічних частот, використання активних фільтрів, які в режимі реального часу генерують компенсуючі струми, заміна обладнання на енергетично чистіші аналоги або оптимізація конфігурації електричної мережі.

Результати ідентифікації джерел гармонік мають бути оформлені у вигляді технічних звітів з обов’язковим зазначенням виявлених рівнів гармонічних спотворень, спектральних характеристик, розрахованої спотвореної потужності та рекомендацій щодо заходів з покращення якості електроенергії. Такі звіти є важливою складовою енергетичної політики

підприємства і використовуються для планування заходів енергоменеджменту, розробки проектів модернізації мереж і подальшого аудиту.

Особливу увагу варто приділяти також дотриманню нормативних документів, таких як IEEE 519-2014 та IEC 61000-4-7, що регламентують допустимі рівні гармонічних спотворень у мережах промислового енергоспоживання. Забезпечення відповідності цим стандартам дозволяє мінімізувати ризики аварійних ситуацій, скоротити витрати на технічне обслуговування обладнання та підвищити загальну ефективність функціонування підприємства.

Таким чином, ідентифікація джерел гармонічних спотворень і спотвореної потужності є важливою процедурою для підтримання належного рівня якості електроенергії на промислових об'єктах. Її систематичне проведення є необхідною умовою для підвищення надійності енергетичної інфраструктури, зниження витрат на енергію і забезпечення безпеки виробничих процесів.

Перелік посилань

1. IEEE. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (IEEE Std 519-2014). IEEE Standards Association. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
2. IEC. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto* (IEC 61000-4-7:2002). International Electrotechnical Commission. Available at: https://webstore.iec.ch/publication/4226

УДК 621.311

Максим ЩУР, аспірант
Світлана ФОРИСЬ, к.т.н., доцент
Дніпровський металургійний інститут
Валерія ПЕРЕРВА, к.т.н., доцент
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ШАХТНОГО МЕТАНУ ТА ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

Концентрація метану в газо-повітряній суміші, що є побічним продуктом вуглевидобутку, змінюється залежно від розробки вугільних лав. Для стабільної роботи когенераційних установок енергоджерел на такій суміші необхідний мінімум 27% метану. При зниженні концентрації спрацьовує захист, і установка припиняє роботу. Для забезпечення стабільної роботи протягом року потрібно дослідити сировинну базу, вивчити об’ємні та компонентні показники, а також розробити схеми стабілізації або підвищення концентрації метану. Рішення цієї проблеми покращить економічну та екологічну ефективність використання когенераційних установок і підвищить енергозабезпечення та надійність вугледобувних підприємств.

Більшість країн останнім часом активно розвивають енергозберігаючі технології та альтернативні види палива. В Україні, хоча й у менших масштабах, експериментують з виробництвом газу та бензину з біомаси, зокрема, бензину з ріпаку та газу з соломи та відходів тваринництва. Однак більш перспективним енергоносієм є вугільний газ, який за обсягами значно перевищує запаси природного газу. За оцінками дослідників, світові ресурси вугільних газів складають близько 160 трлн м³, зокрема в Україні – 1,7 трлн м³ [1].

Україна – один з найбільших джерел викидів метану в Європі. При середньому вмісті метану в вугіллі 15 м³/т і річному видобутку 88,2 млн. т (1,12% від світового), кількість метану, що виділяється при його вилученні та транспортуванні (близько 2 млрд. м³), за впливом на парниковий ефект еквівалентна спалюванню 9 млрд. м³ природного газу [2].

Використання газо-повітряної суміші з шахтним метаном активно досліджувалося в Україні з 2000-х років. Для утилізації шахтного метану розглядалися когенераційні енергетичні модулі на базі газопоршневих установок фірм «Jenbacher», «Deutz» та «Vorholt & Hermeler» з потужністю від 1 до 4 МВт [3].

Особливістю таких об'єктів є коливання концентрації МВС k_2, що подається по каналу основного палива. Для стабілізації потужності використовуються методи збагачення повітря метаном. Розрахунки проводяться для парового котла та газопоршневого двигуна з різними параметрами концентрації та потужності. k_2 подається по каналу основного палива шляхом збагачення метаном повітря. Розрахунок виконаємо для парового котла з α=1,0 і для газопоршневого двигуна з α=1,7. Вихідні дані для розрахунку: (P=6,5 Гкал/год; V_0 = 8013 м^3/год; $V_г^o$ =9,64 м^3/м^3; $Q_{нг}^{р}$ =8689 ккал/м^3). Концентрація МВС каналу повітряного дуття змінюється не більше від k_1=0,0 до допустимого значення k_1=0,025. Загальні данні наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Концентрація МВС каналу повітряного дуття

	α_1= 1,0 (Q_1 = 6 766 м^3/год.)						α_2 = 1,7 (Q_1 = 12562 м^3/год.)					
k_1	0,0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,0	0,005	0,01	0,015	0,02	0,025
K_2	0,4	0,384	0,367	0,351	0,335	0,319	0,4	0,38	0,35	0,32	0,28	0,25

З даних наведених у таблиці 1 слідує висновок про суттєвий вплив концентрації метану k_1 на мінімально допустиму концентрацію k_2 по каналу основного палива при сталості вихідної потужності.

Наявність природного газу на енергетичному об'єкті необхідна для стабілізації теплової та електричної енергії під час коливань дебіту та концентрації МВС, що використовується як основне паливо. Дослідження показують високу ефективність подачі МВС каналу повітряного дуття при сталому значенні k_2, оскільки це зменшує витрати МВС та природного газу для збагачення. При змінній концентрації МВС підвищення його рівня в каналі повітряного дуття дозволяє використовувати суміш з нижчою концентрацією метану, забезпечуючи стабільність енергетичних показників.

У 2018-2020 роках ТОВ «ЦЕППЕЛІН УКРАЇНА» та ТОВ «Інститут ДніпроВНІПІенергопром» реалізували проект «Нове будівництво енергоджерела на базі когенераційної установки Caterpillar на шахті «Степова»», який був введений в експлуатацію за участю ТОВ «РІДЖЕН» та ПрАТ «ДТЕК ПАВЛОГРАДВУГІЛЛЯ». На шахті встановлено енергоджерело на базі когенераційної установки Caterpillar CG170-16 потужністю 1,56 МВт. Основною метою проекту було дослідження можливості використання газо-повітряної суміші з шахтним метаном на вугледобувному підприємстві, виявлення проблем та їх вирішення.

Енергоджерело забезпечує шахту двома формами енергії: електричною та тепловою. Установлено основне обладнання: когенераційна установка Caterpillar CG170-16, модуль підготовки газу GTS 2000, та тепловий пункт для утилізації тепла. Теплова потужність установки покриває потреби шахти в гарячій воді.

Паливом є газо-повітряна суміш із шахтним метаном. Прогнозована витрата палива – 5400 – 6000 м³/год. Технологічний модуль підготовки газу знижує вологість газу до рівня, який підходить для використання в когенераційній установці. Газоповітряна суміш проходить через відцентрову газодувку, що підвищує її тиск, перед подачею на когенераційну установку.

На основі досліджень та реалізованих проектів, можливість будівництва енергоджерел на базі когенераційних установок, що працюють на газоповітряній суміші з шахтним метаном, в Україні є перспективною для подальших досліджень.

«Пілотний проект» на шахті «Степова» підтвердив ефективність використання газоповітряної суміші як альтернативного палива. Використання цієї суміші дозволяє зекономити традиційні енергоресурси (природний газ, вугілля) і зменшити викиди метану в атмосферу.

Основні проблеми, що виникають при реалізації таких проектів:

- нестабільна концентрація метану. Для стабільної роботи когенераційних установок необхідно розробити схеми стабілізації концентрації метану, наприклад, через використання додаткових ємностей або підключення до газопроводів;
- інтеграція енергоджерел у теплові схеми підприємств. Теплові потужності когенераційних установок використовуються не повністю (10-20%), головно для гарячого водопостачання. Однак, ефективне використання утилізованого тепла може значно знизити витрати на опалення та водопостачання, покращивши надійність теплопостачання підприємств.

Загалом, вирішення цих проблем підвищить економічну та екологічну ефективність використання газоповітряної суміші з шахтним метаном, а також знизить залежність від зовнішніх енергоресурсів.

Перелік посилань

1. Азаров Н. Я., Анциферов А. В., Голубєв А. А., Канін В. А., Майборода А. А., Крижановська Л. Н. Ресурси вугільних газів України та перспектива їх видобутку на сучасному етапі. Наукові праці УкрНДМІ НАН України, № 5 (частина I). Донецьк, 2009. С. 352-372.
2. Сай Є.С., Ганушевич К.А. Утилізація шахтного метану та його транспортування в газогідратному стані. Розробка родовищ: Зб. наук. праць. 2014. Т. 8. С. 299-307.
3. Чемерис І.Ф., Дякун І.Л., Рубан В.Д., Ященко Т.Т., Клокова Т.Д., Супова Т.Ю. Інвентаризація джерел забруднення атмосфери на вугледобувних підприємствах Донецької області НАН України. УДК [620.92:621.311:622.012.2].001.6.

УДК 620.92:669

Володимир Васецький, студент
https://orcid.org/0009-0005-0483-8999
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

ЕНЕРГОЄМНІСТЬ МЕТАЛУРГІЇ: ГЛОБАЛЬНИЙ І НАЦІОНАЛЬНИЙ КОНТЕКСТ

Сучасний розвиток енергетичних технологій спрямований на пошук ефективних та екологічно чистих методів генерації електроенергії. Одним із найбільш перспективних напрямів є створення комбінованих систем енергозабезпечення на базі відновлюваних джерел енергії, які забезпечують стабільність постачання електроенергії, зменшують навантаження на централізовані електромережі та сприяють декарбонізації енергетичного сектора. Використання таких систем дозволяє поєднувати переваги різних типів генерації, таких як сонячна, вітрова, гідроенергетика, біогазові установки та геотермальні станції. Однак ефективне використання цих технологій вимагає детального аналізу варіантів інтеграції, оптимізації режимів роботи, впровадження систем накопичення та розподілу електроенергії [1].

Сталь є ключовим будівельним блоком сучасного суспільства. Вона використовується для інфраструктури, будівель, побутової техніки, транспортних засобів, упаковки та багатьох інших продуктів. Її унікальне поєднання міцності, довговічності та можливості переробки ускладнює заміну сталі іншими матеріалами. Крім того, вона є відносно дешевою та широко доступною. Протягом останніх п’ятдесяти років її використання неухильно зростало, і якщо на глобальному рівні не буде вжито активних та скоординованих заходів для скорочення споживання, попит на сталь до 2050 року може зрости більш ніж на третину [1].

Через високу залежність від енергії та викопної сировини традиційне виробництво сталі є енергоємним та призводить до значних викидів вуглецю. У 2019 році сталеливарний сектор був відповідальним за 8% кінцевого світового споживання енергії або 20% промислового використання [1]. У 2020 році цей сектор спричинив 11% глобальних викидів CO_2 та 7% загального використання енергії та пов’язаних із виробничими процесами викидів парникових газів [2, 3].

Щоб досягти цілі Паризької угоди у 1,5°C і уникнути найкатастрофічніших наслідків зміни клімату, викиди CO_2 мають бути зменшені вдвічі до кінця цього десятиліття і досягти нульового рівня до 2050 року, що вимагає негайного скорочення викидів парникових газів у всіх секторах [4].

Сталеливарна промисловість, яка має один із найенергоємніших і найбільш забруднюючих процесів, стоїть перед значними викликами на шляху до декарбонізації. Дослідження показують, що існуючі рішення для зменшення споживання енергії та заміни викопного палива не будуть достатніми для досягнення необхідного скорочення викидів. Потрібні трансформаційні зміни із застосуванням технологій, які перебувають на різних етапах розробки [5].

Металургійна промисловість належить до найбільш енергоємних секторів економіки. На світовому рівні на неї припадає близько 8% кінцевого споживання енергії і приблизно 20% енерговитрат промисловості [1]. Зокрема, сталеливарний сектор споживає величезні обсяги енергії: за оцінками, у 2019 році виробництво сталі забезпечило ≈7% глобальних викидів CO_2 і вимагало значних енергоресурсів через домінування доменного процесу на викопному паливі. Історично галузь досягла суттєвого прогресу в енергоефективності – витрати енергії на тонну сталі зменшилися на ~60% від 1960 року завдяки впровадженню кращих технологій та енергоменеджменту.

Україна не є винятком: металургія традиційно формує значне навантаження на енергосистему. У 2020–2021 роках частка металургійних підприємств у загальному споживанні електроенергії країни становила 23%, поступаючись лише населенню. Це підкреслює критичну важливість енергоефективності для національної економіки. Разом з

тим, енергоємність притаманна і кольоровій металургії – наприклад, виробництво 1 тонни первинного алюмінію потребує в середньому 14–17 тис. кВт·год електроенергії, що підтверджує високі енергетичні витрати галузі [6]. Таким чином, оптимізація енергоспоживання у металургії є актуальною задачею як з точки зору забезпечення конкурентоспроможності, так і для енергобезпеки та екології.

Перелік посилань

3. IEA (2020), Monthly Electricity Statistics, IEA, Paris, Available at: https://www.iea.org/reports/monthly-electricity-statistics
4. Swalec, C. (2022) Pedal to the Metal 2022. *It's not too late to abate emisssions from the global iron and steel sector*. San Francisco, CA, United States of America: Global Energy Monitor. Available at: https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2022/06/ GEM_SteelPlants2022.pdf
5. Swalec, C. and Shearer, C. (2021) Pedal to the Metal 2021. *No time to delay decarbonizing the global steel sector*, Global Energy Monitor. San Francisco, CA, United States of America: Global Energy Monitor. doi:10.7551/mitpress/11314.003.0023
6. Calvin, K., Pereira, J.C. de O. de P., Oreane Edelenbosch Johannes Emmerling, S.F., et al. (2018) 'SPECIAL REPORT Global Warming of 1.5 oC Chapter 2 Mitigation Pathways Compatible with 1.5°C in the Context of Sustainable Development', IPCC special report Global Warming of 1.5 oC, p. 82pp. Available at: https://www.ipcc.ch/site/ assets/uploads/sites/2/2019/02/SR15_
7. Davis, S.J., Lewis, N.S., Shaner, M., et al. (2018) '*Net-zero emissions energy systems*', Science, 360(6396). doi:10.1126/science.aas9793.
8. Агапова В.*Українська металургія після 24 лютого: хто підставить плече атлантові?* Available at: https://voxukraine.org/ukrayinska-metalurgiya-pislya-24-lyutogo-hto-pidstavyt-pleche-atlantovi

УДК 621.313

Ярошенко Я.В. аспірант спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Ципленков Д.В. кандидат технічних наук, доцент
(Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна)

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНЕВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ

Вступ

Сучасна енергосистема потребує ефективних методів збереження енергії для забезпечення стабільності та надійності електропостачання. Одним із перспективних рішень є використання водневих накопичувачів, які дозволяють оптимізувати розподіл надлишкової електроенергії та компенсувати пікові навантаження. Була створена, розглянута та проаналізована математична модель, що описує процеси генерації, акумулювання та використання енергії в енергосистемі України. Результаті отримані на базі моделювання в середовищі Visual Studio Code, з використанням мови програмування Python.

Споживання електроенергії

Енергоспоживання має характерні добові та сезонні коливання. Добове навантаження характеризується двома піковими періодами: **ранковим (08:00–11:00) та вечірнім (19:00–22:00)**. Взимку загальне споживання є вищим, у той час як у літній період воно знижується. Для моделювання споживання використовується функція, що враховує середньодобове значення та амплітуду сезонних і денних коливань (рис. 1).

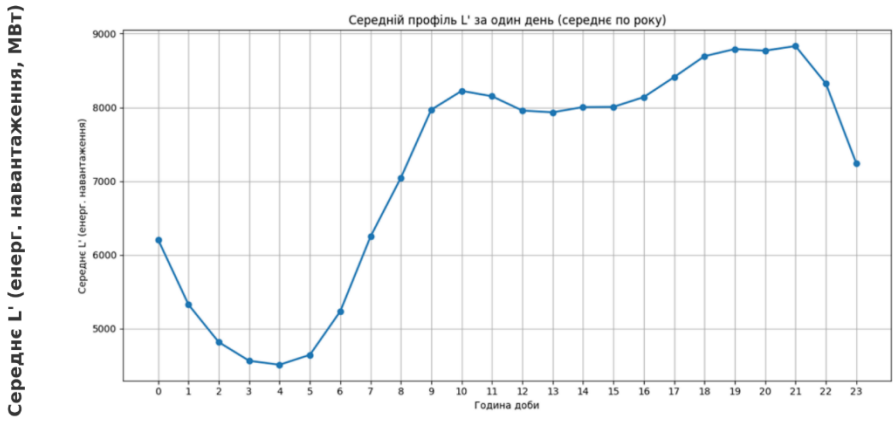


Рисунок 1. Середньодобове споживання електроенергії.

Генерація електроенергії

Джерела генерації поділяються на постійні та регульовані:

- **Атомні електростанції (АЕС)** забезпечують базове навантаження без суттєвих коливань.
- **Теплові електростанції (ТЕС)** використовуються для регулювання потужності.
- **Гідроелектростанції (ГЕС) та відновлювані джерела енергії (ВДЕ)** генерують змінну потужність залежно від погодних умов та часу доби.

Для математичного опису генерації відновлюваних джерел враховуються параметри кута сонця та швидкості вітру, що дозволяє моделювати поведінку ВДЕ в реальних умовах.

Акумулювання та баланс потужності Задля стабілізації енергетичного балансу передбачено використання акумуляторних батарей:

- Максимальна ємність батарей для однієї симуляції: 48 000 МВт·год (40 батарей по 50 МВт).
- Ефективність зарядки та розрядки визначається відповідними коефіцієнтами і дорівнює 70-65% відповідно.
- *Визначено рівняння енергетичного балансу, що включає водневі накопичувачі для оптимального використання надлишкової енергії.*

Модель водневого накопичення

Одним із ключових елементів системи є перетворення надлишкової електроенергії у водень за допомогою електролізера з **ККД 70%** , та паливної комірки (Fuel Cell) з **ККД 65%.** Визначено необхідну кількість водню для покриття пікового режиму однієї симуляції (**≈53130 кг H_2**), що дає можливість забезпечити енергетичну стабільність у періоди максимального споживання під час симуляції.

Сезонний аналіз накопичення водню

Час, необхідний для накопичення цільового рівня водню, залежить від місяця:

- **Весняно-літній період**: 16–26 годин.
- **Осінньо-зимовий період**: до 80+ годин (особливо у лютому).

Швидкість накопичення визначається наявністю надлишкової енергії в системі. У зимовий період цей процес сповільнюється через підвищене енергоспоживання та зменшене виробництво ВДЕ.

Практичне значення

Аналіз результатів показує, що для стабільного функціонування водневої системи необхідно:

- Враховувати сезонні коливання надлишкової енергії.
- Використовувати комбіновані системи з водневими накопичувачами.
- Оптимізувати потужність електролізерів та зберігання водню для забезпечення стабільності у пікові періоди.

Висновки

Розглянута математична модель дозволяє оцінити ефективність впровадження водневих накопичувачів у енергосистему України. Її використання дає змогу мінімізувати втрати енергії, збалансувати навантаження та підвищити надійність електропостачання. Однак необхідно додатково дослідити економічну доцільність такого рішення з урахуванням витрат на інфраструктуру та підтримку державних програм розвитку відновлюваної енергетики.

Список використаних джерел:

1. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с. ISBN 978-966-999-077-8

2. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Mathew Aneke, Meihong Wang, Process and Energy Systems Engineering Group, School of Engineering, University of Hull, HU6 7RX, United Kingdom https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097

3. Yaroshenko, Y., Bobrov, O., Tsyplenkov, D., Kuznetsov, V., & Savvin, O. (2022). Electricity storage systems. Collection of Research Papers of the National Mining University, 71, 131/144. https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.131

4. Ukraine Real-Time Electricity Data Explorer – Data Tools - IEA. (б. д.). IEA. https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/ukraine-real-time-electricity-data-explorer

5. Визначення оптимальних режимів функціонування енергосистеми України при покритті добового графіка електричних навантажень, забезпеченні необхідних обсягів резервування та використанні накопичуючих потужностей В.А. Денисов, Інститут загальної енергетики НАН України, https://doi.org/10.15407/pge2020.04.033

УДК 621.316.92

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

РОЛЬ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ ТА КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПРОМИСЛОВОСТІ

У промислових електроенергетичних системах стабільність параметрів електропостачання має вирішальне значення для безперебійної роботи обладнання, енергоефективності технологічних процесів та зниження експлуатаційних витрат. Одними з ключових технічних засобів для досягнення цих цілей є стабілізатори напруги та компенсатори реактивної потужності, які виконують важливу роль у підтриманні належної якості електроенергії.

Стабілізатори напруги призначені для підтримки рівня напруги у встановлених межах, незалежно від коливань напруги в зовнішніх мережах. У промисловості коливання напруги можуть бути спричинені як зовнішніми факторами (наприклад, нестабільністю на лініях електропередач або аварійними режимами роботи постачальника), так і внутрішніми причинами, такими як запуск або зупинка потужного обладнання. Нестабільна напруга негативно впливає на електродвигуни, електронні системи управління, системи автоматизації та чутливі технологічні процеси. Використання стабілізаторів дозволяє уникнути порушень роботи обладнання, запобігти його перегріву, передчасному зносу та зниженню ефективності виробництва.

Існують різні типи стабілізаторів напруги, серед яких найбільш поширеними є електромеханічні, тиристорні та електронні стабілізатори. Вибір типу залежить від специфіки промислового об'єкта, характеру навантажень та вимог до швидкості регулювання напруги. Стабілізатори з високою точністю підтримання напруги особливо важливі для підприємств, де технологічні процеси є критичними до навіть незначних відхилень параметрів живлення.

Окрім стабілізації напруги, не менш важливою складовою забезпечення якості електроенергії є компенсація реактивної потужності. У промислових електричних мережах значна частка навантаження представлена індуктивними елементами – електродвигунами, трансформаторами, зварювальним обладнанням, що споживають реактивну потужність. Наявність реактивного навантаження призводить до зниження коефіцієнта потужності, збільшення струмів у мережі, підвищення втрат енергії у кабельних лініях та трансформаторах, зниження ефективності використання встановленої потужності.

Компенсатори реактивної потужності, які включають статичні конденсаторні установки, автоматизовані батареї конденсаторів та статичні вар-компенсатори (SVC), виконують завдання генерації необхідної реактивної потужності безпосередньо у місці споживання. Це дозволяє зменшити струмове навантаження на лінії, знизити втрати потужності, стабілізувати рівень напруги та уникнути штрафних санкцій від енергопостачальників за низький коефіцієнт потужності.

Системи компенсації реактивної потужності можуть бути статичними або динамічними. Статичні системи є ефективними в умовах відносно стабільних навантажень, тоді як динамічні системи із тиристорним керуванням дозволяють оперативно адаптувати рівень компенсації до змінних умов роботи промислового підприємства. У складних об'єктах із швидкозмінними навантаженнями комбіноване застосування стабілізаторів напруги і систем компенсації реактивної потужності забезпечує комплексний захист електроенергетичної системи та підтримку високої якості електропостачання.

Впровадження стабілізаторів напруги та компенсаторів реактивної потужності має безпосередній економічний ефект. Підвищення коефіцієнта потужності дозволяє зменшити обсяги споживаної електроенергії, знижує ризик штрафів за перевищення допустимих меж споживання реактивної енергії, зменшує витрати на обслуговування обладнання та продовжує

його експлуатаційний ресурс. Крім того, стабілізація напруги сприяє зниженню аварійності, забезпечує безперебійність технологічних процесів і покращує якість кінцевої продукції.

Таким чином, стабілізатори напруги та компенсатори реактивної потужності є ключовими компонентами систем енергозабезпечення промислових підприємств. Їх правильний вибір, налаштування та інтеграція в існуючу інфраструктуру дозволяють досягти високої енергоефективності, підвищити надійність технологічних процесів та забезпечити економічну стійкість підприємства в умовах постійного зростання вимог до якості електроенергії.

Перелік посилань

1. IEEE Standards Association. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014).* IEEE, 2014. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
2. I. Gueye, A. Kebe and M. Diop, "Design of a Domestic Controlled Voltage Stabilizer," *2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Middlesbrough, United Kingdom, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/UPEC50034.2021.9548231.D. Thomas, K. J. Mathews, L. Thomas, G. S. Babu and S. Saji Kurian, "Automatic Voltage Stabilizer using a PWM controlled AC-AC converter topology," *2022 Third International Conference on Intelligent Computing Instrumentation and Control Technologies (ICICICT)*, Kannur, India, 2022, pp. 51-58, doi: 10.1109/ICICICT54557.2022.9917668.

УДК 621.316.925

Ровенський О.О.
E-mail:rovenskyioleg7@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-0628-5188
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (Україна)

ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

До основних показників якості електроенергії, що нормуються міжнародними та національними стандартами (зокрема IEC 61000-4-30, EN 50160, IEEE 519) [1-6], належать: відхилення частоти мережі; відхилення напруги від номінального значення (довготривалі перенапруги або недонапруги); флікери (повільні коливання напруги, що сприймаються зором як мерехтіння освітлення); короткочасні провали та підвищення напруги; несинусоїдальність напруги (гармонічні викривлення); несиметрія напруги у трифазній системі; короткочасні перенапруги та імпульсні перешкоди.

Відхилення частоти мережі (Δf_{net}):

$$\Delta f_{net} = f_{meas} - f_{nom}, \tag{1}$$

де f_{meas} – виміряна фактична частота (Hz), f_{nom} – номінальна частота (зазвичай 50 або 60 Гц). Частотні відхилення можуть свідчити про дисбаланс між генерацією і споживанням у системі.

Відхилення напруги (довготривалі перенапруги або недонапруги) ΔU_{rel}:

$$\Delta U_{rel} = \left(\frac{U_{meas} - U_{nom}}{U_{nom}}\right) \times 100\%, \tag{2}$$

де U_{meas} – виміряне середнє значення напруги, U_{nom} – номінальне значення (230 В для фази або 400 В для лінії). Перевищення ±10% може вважатися відхиленням за межами норми.

Флікери P_{lt} (освітлювальне мерехтіння):

$$P_{lt} = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(P_{st}^{(i)}\right)^2}, \tag{3}$$

де $P_{st}^{(i)}$ – короткочасний флікер, виміряний протягом і-го 10-хвилинного інтервалу, N – кількість таких інтервалів (зазвичай 12 за годину).

Значення $P_{lt} > 1.0$ вважається надмірним і викликає дискомфорт зорового сприйняття.

Короткочасні провали та підвищення напруги $D_{voltage}$:

$$D_{voltage} = \left(\frac{U_{nom} - U_{min}}{U_{nom}}\right) \times 100\%, \tag{4}$$

де U_{min} - мінімальне значення напруги під час події. Короткочасний провал триває від 10 мс до 1 хв і може викликати збій електронного обладнання.

Гармонічні викривлення (Total Harmonic Distortion) THD_U:

$$THD_U = \sqrt{\sum_{n=2}^{N}\left(\frac{U_n}{U_1}\right)^2} \times 100\%, \tag{5}$$

де U_1 – амплітуда основної (1-ї) гармоніки, U_n – амплітуди n-ї гармоніки, N – загальна кількість врахованих гармонік (зазвичай до 50). Високий THD спричиняє перегрів двигунів, хибну роботу перетворювачів та релейного захисту.

Несиметрія напруги (Voltage Unbalance Factor) VUF:

$$VUF = \frac{U_{negative}}{U_{positive}} \times 100\%, \tag{6}$$

де $U_{negative}$ та $U_{positive}$ – амплітуди відповідно негативної і позитивної послідовностей напруги в симетричному перетворенні. Несиметрія понад 2% вважається загрозливою для трифазних двигунів.

Короткочасні перенапруги та імпульсні перешкоди S_{imp}:

$$S_{imp} = \left(\frac{U_{peak} - U_{nom}}{U_{nom}}\right) \times 100\%, \tag{7}$$

де U_{peak} – амплітуда перенапруги. Ці події тривають мікросекунди-милісекунди, але можуть викликати вихід з ладу чутливого обладнання.

Аналіз показників якості електроенергії у промислових електромережах дозволяє зрозуміти, наскільки складною та багатогранною є ця проблема. Кожен із параметрів, що нормується міжнародними та національними стандартами, має своє технічне і практичне значення, а також безпосередній вплив на роботу обладнання та загальну надійність енергопостачання.

Наприклад, гармонічні спотворення, які виникають через роботу електронних пристроїв, частотно-регульованих приводів та інших нелінійних навантажень, можуть призвести до перегріву трансформаторів, збоїв у роботі релейного захисту та втрати точності вимірювальних приладів. У той же час, флікери, які часто ігноруються на етапі проєктування, значно знижують комфорт працівників, особливо у приміщеннях з освітленням на основі ламп розжарювання чи старих люмінесцентних систем.

Не менш важливими є короткочасні провали напруги, які зазвичай залишаються непомітними, але при цьому здатні миттєво вивести з ладу складне електронне або автоматизоване обладнання. У деяких випадках це призводить до зупинки виробничого процесу, що несе економічні збитки. Подібним чином несиметрія напруги у трифазних мережах створює додаткове навантаження на електродвигуни, скорочує їхній ресурс і підвищує ризик аварій.

Промислові підприємства сьогодні змушені звертати дедалі більше уваги не лише на кількість споживаної енергії, але й на її якість. Це пов’язано як із жорсткістю вимог технічних регламентів, так і з прагненням підвищити енергоефективність та забезпечити безперебійну роботу усіх систем.

Таким чином, якість електроенергії у промислових електромережах є одним із ключових чинників стабільної роботи сучасного підприємства. Параметри, такі як гармонічні спотворення, флікери, несиметрія напруги, короткочасні коливання чи імпульсні перешкоди, мають реальний і часто критичний вплив на технічний стан обладнання, економічні показники виробництва та безпеку персоналу.

Для зменшення впливу цих негативних явищ необхідне впровадження систем моніторингу якості електроенергії, регулярний аналіз навантаження в мережах, використання фільтрувального обладнання, а також активна співпраця з постачальниками енергії щодо

дотримання нормативних стандартів.

Успішне управління якістю електроенергії - це не лише технічне завдання, а й стратегічне рішення, яке впливає на ефективність роботи всього підприємства. Зростаюча складність виробничих процесів та широка інтеграція електроніки вимагають нових підходів до енергоменеджменту, де якість стає не менш важливою, ніж кількість.

Перелік посилань

1. IEC 61000-4-30:2015**.** *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.
2. EN 50160:2010. *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks.* European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), Brussels, 2010.
3. IEEE Std 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2014.
4. IEC 61000-4-15:2010. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-15: Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications*. 2nd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2010.
5. IEC 61000-4-7:2008. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation*. 2nd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2008.
6. IEC 61000-4-5:2014. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-5: Testing and measurement techniques – Surge immunity test*. 3rd ed. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2014.

УДК 621.313

Самоволик Н.Д., студент гр. ЕП-21-1
Бобров О.В., к.т.н., доцент, викладач спеціальних та електротехнічних дисциплін
(Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара»)

ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ВЕС

Актуальність теми.

Побудова вітроелектростанцій (ВЕС) є важливою складовою розвитку відновлюваної енергетики, яка має значний вплив на енергетичний перехід від невідновлюваних традиційних джерел енергії. Розгляд технічних аспектів побудови ВЕС набуває актуальності в умовах підвищення потреби в екологічно чистій енергії, що обумовлено глобальними викликами, такими як зміна клімату, енергетична криза, а також інтеграція відновлюваних джерел енергії в існуючі енергосистеми по всьому світу.

Існуючі проблеми.

1. *Вибір місця розташування* (**Нерівномірність вітрових ресурсів, негативний екологічний вплив на летючих тварин та ландшафт, соціальні аспекти, можливе невдоволення людей**.);
2. *Технічні характеристики турбін* (**Знос і недовговічність компонентів**, **знос компонентів через резонансні явища, знижена ефективність вітротурбін** у районах із низькою швидкістю вітру.);
3. *Фундаментні конструкції* (**Складність інженерних рішень, недовговічність через карозію** в морських умовах.);
4. *Інтеграція в енергетичну мережу* (**Нестабільність виробництва енергії, проблема зберігання та стабільного постачання енергії**.);
5. *Моніторинг і обслуговування* (**складність доступу, зупинка генерації електроенергії та дорогі ремонти**, **брак інтелектуальних систем моніторингу**.);
6. *Вплив кліматичних змін* (**Екстремальні погодні умови** створюють додаткові ризики для конструкцій і обладнання.);
7. *Регуляторні та стандартизаційні проблеми* (**Різні технічні стандарти у**складнюють транспортування та монтаж турбін у різних країнах, д**ефіцит кваліфікованих кадрів**.);
8. *Екологічна утилізація* (**Утилізація лопатей, розбір конструцій і виведення їх з експлуатації**.).

Основні технічні аспекти побудови ВЕС.

1. *Вибір території для розташування ВЕС:* При виборі ділянки для спорудження треба враховувати небезпеку виникнення ерозійних процесів, що можуть призвести до недовговічної експлуатації вітроустановки і шкоди полям, які знаходяться в околицях вітропарку. Необхідно уникати близькості схилів, балок, урвищ і відмовлятись від ділянок, розташованих вздовж схилів. За можливості, проводити розташування ВЕС в межах сільськогосподарського ландшафту, а самі споруди та генеруючі установки в лісосмугах. Наприклад, споруджувати ВЕС в деградованих лісосмугах між полями, на колишніх тваринницьких комплексах або рисових чеках, солонцях, тим самим не пошкоджуючи орні землі та природні ділянки.
2. *Вибір конструкції вітрових турбін (горизонтальні чи вертикальні вітряки).*

Горизонтальні вітрові турбіни – це тип вітряків, де основна вісь ротора (вітрової турбіни) розташована горизонтально відносно поверхні землі.

Вертикальні вітрові турбіни – це тип вітряків, у яких основна вісь ротора розташована вертикально відносно поверхні землі.

Критерії вибору одного з них:

Швидкість вітру. Горизонтальні турбіни ефективні при високих швидкостях вітру, в той час як вертикальні можуть працювати при низьких швидкостях.

Простір та екологічний вплив. Вертикальні турбіни можуть бути ефективні в обмежених просторах, і вони часто менше впливають на довкілля.

Вартість та технічна складність. Горизонтальні турбіни мають довгу історію успіху та можуть бути економічно вигідні, але вертикальні турбіни можуть бути простішими у виготовленні та обслуговуванні.

3. *Визначення оптимального розміру та кількості вітрових турбін:* Визначення оптимального розміру та кількості вітрових турбін для ефективної електрогенерації включає ряд факторів і розрахунків: швидкість вітру, розмір турбіни, ефективність та видача енергії, простір який займають турбіни та їх розташування, оцінка вартості будівництва, утримання та експлуатації турбін, а також розрахунок рентабельності проекту.
4. *Використання сучасних технологій виробництва вітроенергетичного обладнання:* У сучасних побудовах використовують більш продвинуті технології, а саме використовують легкі та міцні матеріали такі як спеціальні композитні матеріали, вуглецеві волокна та кевлар, що дозволяє знизити вагу та збільшити міцність вітроенергетичних конструкцій. Виготовлення деяких елементів вітроенергетичного обладнання за допомогою 3D-друку, що спрощує процес виробництва та дозволяє створювати складні форми. Будування датчиків для спостереження стану ВЕС в реальному часі, а також поліпшення генераторів для кращої конвертації енергії. Всі ці технології впроваджуються для покращення та поліпшення експлуатації ВЕС та збільшення їх ефективності і прибутку від них.

Висновки: Отже, технічні аспекти побудови вітроелектростанцій (ВЕС) відіграють вирішальну роль у забезпеченні ефективності використання, надійності та стійкості у подальшій експлуатації цих ВЕС. Глобальний перехід до екологічно чистих джерел енергії, викликаний зміною клімату та необхідністю зменшення залежності від традиційних вичерпних джерел енергії, робить ВЕС стратегічно важливими для сучасної енергетики.

УДК 620.92:669

Володимир Васецький, студент
https://orcid.org/0009-0005-0483-8999
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА СТРУКТУРА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ

Металургійні виробництва характеризуються складним технологічним циклом, кожен етап якого споживає велику кількість енергії. Так в якості прикладу розглянемо особливості доменно – конверторного процесу. Цей комплексний процес охоплює процес підготовки сировини, процес виробництва чавуну, процес виробництва сталі та процес прокатки [1]. Як відомо [1], виробництво сталі – це складний технологічний процес, що потребує значних енергетичних ресурсів і точного контролю хімічних реакцій. Один із найпоширеніших методів виплавки сталі у світі – доменно-конвертерний процес, який дозволяє ефективно переробляти залізну руду у високоякісну сталь. Цей процес складається з двох основних етапів: виплавка чавуну у доменній печі; переробка чавуну у сталь у кисневому конвертері.

Доменний процес: Доменна піч – це висока вертикальна споруда, яка працює безперервно. Сировина завантажується у верхню частину печі, а кінцевий продукт (рідкий чавун і шлак) виводиться внизу. Температура всередині печі досягає 2000°C, що забезпечує необхідні умови для відновлення заліза з руди. Щоб отримати чавун, у доменну піч завантажують три основні компоненти: Залізна руда (гематит Fe_2O_3 або магнетит Fe_3O_4) – основне джерело заліза; Кокс (C) – паливо, яке забезпечує тепло і служить відновником; Флюси ($CaCO_3$, доломіт) – допомагають видаляти домішки і утворювати шлак. Домішки переходять у шлак, а на дні печі накопичується рідкий чавун із вмістом 4-5% вуглецю. Після цього розплавлений чавун випускають і транспортують у кисневий конвертер для подальшої переробки.

Киснево-конвертерний процес: Рідкий чавун, отриманий у доменній печі, містить надмірну кількість вуглецю та інших домішок, що робить його крихким і непридатним для використання в промисловості. Щоб отримати сталь, необхідно зменшити вміст вуглецю та видалити інші небажані елементи. Це відбувається в кисневому конвертері. Конвертер – це великий стальний котел, що нахиляється для завантаження чавуну та випуску сталі. У нього подають: рідкий чавун (75-85%); металобрухт (15-25%) – використовується для охолодження розплаву; чистий кисень (O_2) під тиском 10-12 бар – головний окислювач, який спалює домішки.

У чорній металургії (виробництво сталі) існують наступні ключові стадії:

Підготовка сировини: агломерація (спікання) залізної руди та виробництво окатишів, а також коксування вугілля. Ці процеси потребують теплової енергії для спікання рудного концентрату і випалу коксу. Теоретичні мінімальні витрати енергії на цих стадіях оцінюються в межах ~2,5 ГДж на тонну коксу і ~1,0 ГДж на тонну агломерату відповідно [1], отже вони суттєво впливають на загальну енергоємність.

Виробництво чавуну: доменний процес (BF) оснований на використанні коксу як палива і відновника. Він забезпечує високу продуктивність, але переважно покладається на енергію від спалювання вугілля. Для прикладу, ~89% енергії в циклі BF-BOF (доменна піч – кисневий конвертор) надходить із коксу й вугілля, і лише ~7% – з електроенергії [2]. Електричні витрати доменного виробництва відносно малі – порядку 3–4 кВт·год на тонну гарячого чавуну [3], оскільки основне теплове навантаження забезпечує кокс.

Виробництво сталі: традиційний конверторний процес (BOF) використовує енергію розплавленого чавуну і незначну частку додаткового палива, тоді як альтернативний електроплавильний шлях – дугова сталеплавильна піч (EAF) – споживає переважно електроенергію. Електровитрати на виплавку сталі в ЕДП надзвичайно високі, типовий рівень становить близько 300–400 кВт·год на тонну сталі [3]. Для порівняння, мартенівські печі

(застаріла технологія, нині майже не використовується) споживали ~4 кВт·год електроенергії на тонну сталі [3], проте потребували значної кількості палива, через що мали низьку ефективність і були витіснені сучаснішими процесами.

Прокат та обробка: гарячий і холодний прокат, термічна обробка, тощо – ці стадії теж вимагають енергії (переважно для нагрівання заготовок, приводу прокатних станів, компресорів тощо). Хоча їх частка в загальному енергобалансі менша, оптимізація цих процесів (наприклад, за рахунок утилізації тепла гарячого металу, скорочення простоїв) також дає ефект.

Первинне виробництво сталі з руди є значно енергоінтенсивнішим, ніж вторинне з брухту. Переплавлення брухту в електропечах вимагає приблизно в 8 разів менше енергії, ніж повний цикл від залізної руди [4]. За даними [4], виплавка сталі із брухту може потребувати лише ~12–15% енергії порівняно з рудним маршрутом [4]. Це пояснюється тим, що в вторинному виробництві відсутня стадія відновлення заліза з оксидів – найбільш енергомістка хімічно. В середньому, інтегрований цикл BF-BOF споживає ~19–35 ГДж на тонну сталі, тоді як EAF на брухті – близько 4–7 ГДж/т [2].

Точні показники залежать від якості сировини, асортименту продукції та рівня оснащення заводу. Так, якість руди і коксу, вихід стали із шлаку, глибина переробки – всі ці фактори впливають на питомі витрати енергії. Навіть непрямі витрати – видобуток і транспортування сировини – додають ~6–9% до сумарного енергоспоживання на тонну металу [2]. Таким чином, розуміння структури енергоспоживання в межах виробничого ланцюга дозволяє виявити "гарячі точки" – найбільш енергоємні переділи – і спрямувати зусилля на їх оптимізацію.

Перелік посилань

1. Na, Hongming, Jingchao Sun, Yuxing Yuan, Ziyang Qiu, Lei Zhang, and Tao Du. 2024. "*Theoretical Energy Consumption Analysis for Sustainable Practices in Iron and Steel Industry*" Metals 14, no. 5: 563. https://doi.org/10.3390/met14050563
2. Energy use in the steel industry. Available at:https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf
3. D. Tymoshenko, V. Kukhar, and I. Volovnenko, "*Comparison of Energy Consumption in Steel Production Using Obsolete Sintering–Blast Furnace and Open-Hearth Processes versus Modern Midrex H_2 Direct Reduction and Electric Arc Furnace Technology*," *Metinvest Polytechnic Scientific Journal. Series: Technical Sciences*, no. 2, pp. 49–54, 2024. [In Ukrainian]
4. H2FUTURE*: decarbonising the steel industry with green hydrogen*. By Claudia Patricolo.May 20, 2021 Available at: https://ceenergynews.com/hydrogen/h2future-decarbonising-the-steel-industry-with-green-hydrogen/

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У сучасних електроенергетичних системах забезпечення високої якості електроенергії є важливим завданням, яке безпосередньо впливає на ефективність, надійність і безпеку роботи споживачів електроенергії. Під якістю електроенергії розуміють сукупність характеристик напруги та струму, що визначають їхню придатність до використання в електричних пристроях без порушення режимів їх роботи. Параметри якості електроенергії включають частоту, рівень напруги, симетрію фаз, форму хвилі, наявність гармонічних спотворень, короткочасні переривання, провали та перенапруги. З огляду на важливість цих характеристик розроблені спеціалізовані методи вимірювання та моніторингу, що дозволяють оцінити реальний стан енергопостачання у будь-який момент часу.

Основою для оцінювання параметрів якості електроенергії є безперервні або періодичні вимірювання із використанням сучасних засобів вимірювальної техніки. Найпоширенішим інструментом є аналізатори якості електроенергії, які здатні реєструвати величину напруги, струму, активної, реактивної та повної потужності, коефіцієнт потужності, частоту, а також визначати рівні загального гармонічного спотворення (THD) та спектральний склад сигналів. Такі аналізатори забезпечують високу точність вимірювань завдяки цифровій обробці сигналів та використанню алгоритмів швидкого перетворення Фур'є для спектрального аналізу.

Процедура вимірювання, як правило, базується на стандартизованих методиках, що визначені міжнародними нормами, такими як IEC 61000-4-30 для методів вимірювання параметрів електроенергії та IEC 61000-4-7 для методів вимірювання гармонік і міжгармонік. Стандарти встановлюють вимоги до частоти дискретизації, точності фіксації подій, обробки короткочасних відхилень та синхронізації з еталонними годинниками.

Моніторинг якості електроенергії може здійснюватися за допомогою портативних або стаціонарних пристроїв. Портативні аналізатори застосовуються для проведення періодичних аудитів або діагностики проблем, тоді як стаціонарні системи моніторингу забезпечують безперервний контроль параметрів мережі у режимі реального часу. Такі системи інтегруються у мережеву інфраструктуру та часто оснащуються можливістю віддаленого доступу і передачі даних на диспетчерські пункти.

Одним із важливих аспектів вимірювань є правильний вибір точок контролю. Типово контроль здійснюється на вводах споживачів, у розподільчих пристроях, на секційних шинах, а також безпосередньо біля особливо чутливого обладнання. При цьому обов’язково враховуються характер навантаження, архітектура мережі та наявність джерел потенційних спотворень, таких як великі перетворювальні пристрої або генератори з нестабільними характеристиками.

Дані, отримані в ході моніторингу, підлягають ретельному аналізу з метою виявлення відхилень від нормативних значень. Особливу увагу приділяють тривалості та частоті короткочасних відхилень напруги, ступеню асиметрії фаз, вмісту вищих гармонік у напрузі та струмі, а також наявності міжгармонік. Виявлені відхилення можуть бути підставою для розробки технічних рішень, спрямованих на покращення якості електропостачання, таких як встановлення компенсуючих пристроїв, фільтраційних систем або стабілізаторів напруги.

Окрему роль у системах моніторингу відіграють інтелектуальні алгоритми обробки даних, що дозволяють автоматично класифікувати події, визначати їх причини та прогнозувати подальший розвиток ситуації в енергосистемі. Застосування систем штучного інтелекту у сфері аналізу якості електроенергії відкриває нові можливості для раннього виявлення потенційних аварій та оптимізації режимів роботи споживачів.

Важливо зазначити, що результати моніторингу повинні регулярно документуватися та використовуватися для формування звітів про якість електроенергії, які надаються як внутрішнім підрозділам підприємств, так і зовнішнім органам контролю. Таким чином, систематичний моніторинг параметрів якості електроенергії є необхідною умовою забезпечення стабільної, економічно ефективної та безпечної експлуатації промислових і комерційних електротехнічних систем.

Перелік посилань

3. IEC. (2015). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods* (IEC 61000-4-30:2015). International Electrotechnical Commission. Available at: https://webstore.iec.ch/publication/22865
4. IEC. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto* (IEC 61000-4-7:2002). International Electrotechnical Commission. Available at: https://webstore.iec.ch/publication/4226

УДК 621.31

Kolb A.A. PhD, Associate Professor of the Electrical Engineering Department.
Morozov I.V., postgraduate student specialty 141 - Electric power engineering, electrical engineering, and electromechanics.
(Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine)

PROSPECTS OF HYBRID ACTIVE POWER FILTERS IN SYSTEMS FOR IMPROVING ELECTRIC POWER QUALITY

Modern energy infrastructure faces growing demands for electric power quality due to the widespread adoption of nonlinear loads such as frequency converters, variable-speed drives, and other devices. These loads cause the appearance of voltage and current harmonics, power pulsations, reduced power factor, and other network operation disturbances. As a result, the development of effective means for improving power quality has become a priority for specialists in the field of electrical engineering.

Principle of Operation of Hybrid Active Power Filters

A hybrid active power filter (HAPF) represents a modern solution for harmonic compensation and stabilization of electrical power parameters. Its design combines the advantages of both active and passive filters. The active part of the HAPF includes an inverter controlled by a microcontroller or digital signal processor, which generates currents that are opposite in phase and equal in magnitude to the harmonic components of the load current. The passive part, consisting of capacitors, inductors, and resistors, provides additional filtering of low-order harmonics and reduces the load on the active part of the filter.

The main principle of operation of the HAPF is as follows: sensors measure the actual values of the load current, after which the control algorithm generates a control signal for the inverter, which produces a compensating current. This current is added to the load current at the point of connection of the filter, allowing for the elimination of harmonic components and normalization of the current waveform. Thanks to the presence of the passive part, the HAPF can operate effectively even at high levels of harmonics and significant load variations.

Comparison with Conventional Active Power Filters

A conventional active power filter (APF) operates similarly but relies entirely on its active part for harmonic compensation. This requires more powerful inverters and increases energy losses within the filter itself. Furthermore, active filters may be less effective at compensating higher-order harmonics, as the capabilities of electronic components limit their frequency characteristics.

The hybrid active filter addresses these issues by incorporating a passive part, which takes over some of the functions of harmonic filtering. This allows for the use of less powerful inverters, reduces energy consumption, and improves the system's overall efficiency. Additionally, the passive part contributes to better stability during sudden load changes and noise reduction in the network.

Comparison with Traditional Means of Improving Power Quality

Traditional power quality correction methods, such as passive filters and power factor correction installations, have advantages and disadvantages. Passive filters are simple in design and relatively inexpensive, but they adapt poorly to changing operating conditions and can cause resonance phenomena under certain load combinations. Power factor correction installations (e.g., capacitor banks) are also limited in their capabilities, as they cannot compensate for harmonics or power pulsations.

In contrast, hybrid active filters provide a comprehensive solution to the problem: they can simultaneously compensate for harmonics, stabilize the power factor, and eliminate voltage pulsations. Thanks to their adaptability, HAPFs can operate effectively under varying load conditions and different types of nonlinear consumers.

Conclusion:

Hybrid active filters (HAFs) represent a promising direction in developing technologies for improving electrical energy quality. Their main advantages include high efficiency, adaptability, and

application versatility. Compared to conventional active filters, hybrid solutions allow for reduced energy consumption and improved operational reliability due to using the passive component. At the same time, compared to traditional methods, HAFs provide a wider range of functional capabilities and better compatibility with modern nonlinear loads.

The development of hybrid active filter technology opens up new opportunities for enhancing the quality of electrical energy in both industrial and residential networks. This is particularly important given the growing number of nonlinear consumers and the increasing complexity of power grid infrastructure. The prospects for hybrid filters are tied to introducing new materials for passive components, optimization of control algorithms, and improving the economic efficiency of solutions. Integrating artificial intelligence and machine learning will enable the creation of more accurate predictive control models, thereby increasing system adaptability to changing operating conditions. Developing modular HAF designs will also ensure scalability and applicability in distributed energy systems, such as microgrids and systems utilizing renewable energy sources.

Thus, further refinement of hybrid active filters has the potential to significantly improve the quality of power supply in modern energy systems, making them more stable and environmentally friendly.

References:

1. IEEE Standard for Active Filters in Power Systems (IEEE Std 1547-2018) Institute of Electrical and Electronics Engineers.
2. Zhang L., Chen Y., Liu X. Hybrid *Active Power Filters: Design and Implementation*. Springer, 2017.
3. Kumar S., Singh B., Mishra M."A Review of Hybrid Active Power Filters for Power Quality Improvement." *Electric Power Components and Systems*, Vol. 46, No. 10, 2018.
4. Molinas M., Candela J.I., Luna A." Advanced Control Techniques for Hybrid Active Filters in Distributed Power Systems." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 64, No. 5, 2017.
5. Gupta R., Agarwal V., Tiwari A." Integration of Artificial Intelligence in Hybrid Active Filters for Enhanced Performance." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 96, 2018.
6. Pazynich, Y., Kolb, A., & Potempa, M., "Implementation of Energy Safety Policy in Ukraine by Means of Energy Saving in Electric Drive Systems", *Advanced Engineering Forum,* Vol. 25, pp. 96-105, 2017

УДК 620.92:669

Володимир Васецький, студент
https://orcid.org/0009-0005-0483-8999
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД

За останні десятиліття металургія накопичила значний міжнародний досвід впровадження енергозберігаючих технологій. Багато з них відображені у міжнародних стандартах найкращих практик (Best Available Techniques, BAT) та галузевих довідниках. Дослідження показують, що застосування сучасних енергоефективних технологій здатне скоротити енергоспоживання сталі приблизно на 20% проти середнього рівня, якщо по всьому світу довести виробництво до рівня Best Available Techniques [1]. Половину цього потенціалу покращення припадає на країни з традиційно вищими питомими витратами (зокрема, Китай [1]).

Ключові напрямки підвищення енергоефективності включають:

Утилізація вторинних енергоресурсів. Сучасні комбінати широко впроваджують системи утилізації тепла і газів: наприклад, використання доменного газу і конвертерного газу для генерації електроенергії або нагріву повітря, установка установок когенерації, сухе гасіння коксу (CDQ) для повернення тепла від коксу, турбогенератори топкового тиску (TRT) на доменних печах. Ці заходи дозволяють ефективніше використовувати енергію палива і знижувати витрати на сторонні енергоносії. За оцінками World Steel Association, до 60–75% енергії, що міститься в газах доменного і коксового виробництва, може бути повернуто в цикл або використано для вироблення електрики замість втрат [2].

Модернізація обладнання і процесів. Перехід на новітні агрегати – такі як печі з регенеративними пальниками, більш досконалі системи подачі кисню, перехід з мартенів на конвертори або електропечі – приводить до суттєвої економії енергії на тонну продукції. Наприклад, заміна застарілих мартенівських печей в світі практично завершена, що ліквідувало їх характерно низьку ефективність. Натомість, електродугові печі з сучасними системами керування досягли високої продуктивності та можуть працювати із зниженими втратами тепла. Так само, впровадження безперервного розливання сталі замість багатостадійного прокату дозволило скоротити повторні нагріви злитків і заощадити паливо.

Енергоменеджмент та цифрові технології (Industry 4.0). На багатьох підприємствах діють автоматизовані системи енергоменеджменту (EMS), які моніторять та оптимізують споживання енергії в режимі реального часу [2].

Використання датчиків, великих даних та штучного інтелекту дозволяє краще регулювати роботу печей, компресорів, прокатних станів, мінімізувати холості простої та пікові навантаження. У ЄС фіксуються приклади, коли цифровізація забезпечила до 30+% покращення енергоефективності на окремих дільницях [3]. Хоча вплив Industry 4.0 ще досліджується, тенденція очевидна: «розумні» заводи здатні більш раціонально використовувати енергію, зменшуючи витрати та викиди.

Інші заходи: підвищення якості теплоізоляції та використання сучасних матеріалів (наприклад, більш довговічні вогнетриви, що знижують втрати тепла); регенерація тепла охолоджуючих систем; впровадження високоефективних електродвигунів і частотних перетворювачів для механізмів тощо – все це в сукупності формує культуру енергозбереження на підприємствах. Такі заходи часто мають відносно короткий період окупності і підтримуються міжнародними програмами енергоефективності.

Міжнародний досвід демонструє ефективність згаданих підходів. Приміром, у розвинених країнах (Японія, Південна Корея, ЄС) енергоємність виробництва сталі зараз

наближається до теоретичних меж завдяки широкому впровадженню BAT. Натомість у країнах, що розвиваються, спостерігається ширший діапазон, але активна модернізація (особливо в Китаї, який дає ~50% світової сталі). Важливо, що більше половини світового потенціалу енергозбереження в сталі зосереджено саме в китайській металургії [1] – це стимулює міжнародні проекти обміну технологіями та інвестиції в оновлення сталеплавильних потужностей. Українська металургія також впроваджує енергоощадні рішення: останніми роками реалізовано проекти з утилізації газів, модернізовано прокатні стани, встановлено більш ефективні котли та нагрівачі на ряді комбінатів. Таким чином, глобальний тренд на підвищення енергоефективності охоплює і національний рівень, що відображено у публікаціях і дослідженнях вітчизняних науковців за останні 5 років.

Перелік посилань

5. Kun He, Li Wang, *A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 70, 2017, Pages 1022-1039, ISSN 1364-0321,https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007.
6. Energy use in the steel industry. Available at:https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf
7. Tolettini, L.; Di Maria, E. *The Impact of Industry 4.0 on the Steel Sector: Paving the Way for a Disruptive Digital and Ecological Transformation*. Recycling 2023, 8, 55. https://doi.org/10.3390/ recycling8040055

УДК 621.316.925

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПІДПРИЄМСТВАХ: КЕЙС-СТАДІ

У сучасних умовах розвитку промисловості та зростання енергетичних навантажень питання якості електроенергії набуває особливої актуальності. Ефективне управління якістю електроенергії на підприємствах є критичним фактором забезпечення стабільної роботи виробничого обладнання, підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат і мінімізації ризиків виробничих простоїв. Практика впровадження систем управління якістю електроенергії базується на системному підході, що охоплює моніторинг параметрів електричної енергії, аналіз порушень, впровадження технічних рішень щодо компенсації спотворень та оптимізацію структури електричних мереж.

На прикладі великого промислового підприємства можна детально проаналізувати основні етапи впровадження такої системи. На початковому етапі була проведена комплексна діагностика якості електроенергії у ключових точках внутрішньої електромережі. Вимірювання здійснювалися з використанням високоточних аналізаторів, що реєстрували рівень напруги, частоту, коефіцієнт потужності, загальне гармонічне спотворення струму та напруги, а також фіксували провали, перенапруги та короткочасні переривання. Протягом місяця спостереження було зібрано великий обсяг даних, що дозволило скласти детальну картину фактичного стану електропостачання.

Аналіз результатів показав наявність декількох критичних проблем. По-перше, спостерігався високий рівень гармонічних спотворень у струмі, що перевищував допустимі межі за стандартом IEEE 519-2014 у ряді виробничих цехів. Основними джерелами гармонік були частотні перетворювачі, зварювальне обладнання та системи безперебійного живлення. По-друге, були зафіксовані часті короткочасні провали напруги, що негативно впливали на стабільність роботи автоматизованих виробничих ліній. По-третє, в окремих секціях мережі спостерігалася недостатня компенсація реактивної потужності, що призводило до зниження коефіцієнта потужності і додаткових штрафних санкцій від постачальника електроенергії.

На основі виявлених проблем була розроблена стратегія вдосконалення системи електропостачання, яка включала кілька взаємопов’язаних технічних заходів. Першим кроком стало встановлення активних фільтрів гармонік у виробничих цехах, що дозволило суттєво знизити рівень спотворень і наблизити показники якості до нормативних значень. Активні фільтри були обрані через їхню здатність працювати в умовах змінних навантажень та автоматично адаптуватися до спектру гармонік у режимі реального часу.

Другим важливим заходом стало впровадження автоматизованої системи компенсації реактивної потужності на базі тиристорних батарей конденсаторів. Це рішення дозволило не лише підтримувати коефіцієнт потужності на рівні понад 0,95, але й оперативно реагувати на зміну навантаження, мінімізуючи ризик перенавантаження мережі та покращуючи енергоефективність.

Для підвищення надійності живлення критичних споживачів було запроваджено модульну систему безперебійного живлення, що працює у поєднанні з дизель-генераторними установками. Така комбінація гарантувала безперервність електропостачання навіть у разі серйозних відхилень параметрів напруги або її повного зникнення на стороні постачальника.

Крім технічних заходів, важливою частиною проєкту стало впровадження системи постійного моніторингу параметрів якості електроенергії. На основних вводах підприємства, а також у критичних точках розподільної мережі були встановлені аналізатори якості електроенергії з функцією онлайн-моніторингу та архівації даних. Всі дані передавалися до центрального диспетчерського пункту, де проводився аналіз і візуалізація інформації.

Наявність історичних даних дозволила виявляти тенденції зміни якості електроенергії та прогнозувати потенційні ризики.

Результати впровадження системи управління якістю електроенергії стали очевидними вже протягом перших місяців експлуатації. Було зафіксовано суттєве зниження кількості аварійних вимкнень обладнання, скорочення випадків зупинок виробничих ліній через збої в електропостачанні, зменшення кількості дефектної продукції. Економічний ефект проявився у скороченні витрат на ремонт обладнання, зменшенні обсягів споживання електроенергії за рахунок підвищення коефіцієнта потужності та уникнення штрафних санкцій від енергопостачальника.

Додатковим позитивним наслідком стало підвищення стабільності роботи інформаційних систем підприємства, адже багато проблем, пов'язаних із просадками напруги та нестабільністю живлення, були успішно вирішені. Зросла довговічність силових трансформаторів і електродвигунів, що працювали тепер у більш сприятливих умовах.

Ключовим висновком із проведеного кейс-стаді стало розуміння, що управління якістю електроенергії – це не разова акція, а безперервний процес, що вимагає постійного моніторингу, аналізу даних і оперативного реагування на зміни в умовах експлуатації мережі. Тільки комплексний підхід, що об'єднує технічні рішення, програмне забезпечення для моніторингу і стратегічне планування, дозволяє досягти стійкого покращення показників якості електроенергії.

Таким чином, досвід впровадження системи управління якістю електроенергії на промисловому підприємстві демонструє реальну можливість суттєво підвищити ефективність використання електроенергії, підвищити надійність технологічних процесів і забезпечити довготривалу безперебійну роботу енергетичної інфраструктури. У майбутньому очікується подальший розвиток таких систем на основі інтелектуальних технологій обробки великих даних, прогнозної аналітики і глибокої інтеграції енергетичних процесів у загальні бізнес-процеси підприємства.

Перелік посилань

1. W. Jian, L. Xiaomeng, X. Dianguo and D. Guangren, "Parameter design and multi-objective optimization of shunt active filter switching harmonic filter based on genetic algorithm," *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, China, 2011, pp. 1562-1567, doi: 10.1109/ICECC.2011.6066445.
2. A. S. Ray and A. Bhattacharya, "A noble transformer coupled shunt active hybrid power filter," *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, Spain, 2015, pp. 2571-2579, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125477.
3. IEEE Standards Association. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014)*. IEEE, 2014. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710

УДК 620.92:669

Володимир Васецький, студент
https://orcid.org/0009-0005-0483-8999
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Металургійна промисловість відіграє одну з ключових ролей у розвитку економіки будь-якої індустріально розвиненої країни. Вона забезпечує базові матеріали для будівництва, машинобудування, транспорту, енергетики та багатьох інших галузей. Разом із тим, металургія є однією з найенергоємніших галузей важкої промисловості. Її виробничі процеси вимагають величезної кількості як теплової, так і електричної енергії, що зумовлює необхідність детального аналізу, раціонального планування та постійної оптимізації енергоспоживання.

Основною причиною високого рівня енергоспоживання в металургії є складність технологічних процесів. Для виробництва сталі чи кольорових металів необхідно проходити кілька етапів обробки сировини, включаючи збагачення, агломерацію, випал, плавлення, рафінування, прокатку, термічну та хімічну обробку. Усі ці стадії потребують значної кількості енергії, зокрема теплової – для підтримки високих температур у доменних, мартенівських, електроплавильних печах – і електричної – для живлення механізмів, насосів, транспортерів, компресорів, електропечей, а також систем управління й автоматизації.

Найбільш енергоємними є процеси первинного виробництва металів, особливо виплавка чавуну й сталі в доменних і конвертерних цехах, а також виробництво алюмінію, що вимагає колосального електроспоживання. Наприклад, виробництво однієї тонни первинного алюмінію може потребувати до 15–20 МВт·год електроенергії. Це робить енергетичні витрати не лише економічно значущими, а й стратегічно важливими з точки зору енергобезпеки держави [1].

Сучасні засади енергоспоживання в металургії базуються на кількох ключових принципах, головним з яких є підвищення енергоефективності. Це означає не лише зниження абсолютного обсягу споживаної енергії, а й досягнення максимальної продуктивності при мінімальних енерговитратах. Реалізація цього принципу вимагає комплексного підходу, що включає модернізацію обладнання, впровадження сучасних технологій, оновлення теплоізоляційних матеріалів, а також інтеграцію систем автоматичного моніторингу та управління енергоспоживанням.

Важливим напрямком є також вторинне використання енергетичних ресурсів, яке дозволяє значно скоротити загальні витрати. Зокрема, йдеться про рекуперацію тепла з відхідних газів, утилізацію гарячих шлаків, використання тепла охолоджувальної води або пари. Такі заходи не лише зменшують потребу в первинному паливі, а й знижують викиди парникових газів, що є суттєвим внеском у боротьбу зі змінами клімату.

Крім технічних аспектів, значну роль у підвищенні енергоефективності відіграють організаційно-управлінські заходи. Наприклад, впровадження систем енергетичного менеджменту відповідно до міжнародних стандартів, таких як ISO 50001, дозволяє підприємствам системно підходити до планування та контролю енергоспоживання. Це включає аналіз енергетичних потоків, встановлення ключових показників ефективності, навчання персоналу, розробку планів енергозбереження та контроль їх реалізації [2].

Ще один важливий інструмент – проведення регулярних енергоаудитів. Вони дають змогу точно оцінити поточний стан енергоспоживання, виявити втрати, «слабкі місця» та зони потенційного покращення. За результатами таких аудитів складаються детальні програми модернізації, що можуть включати як великі інвестиційні проєкти, так і невеликі зміни, які швидко окупаються – наприклад, заміна двигунів на більш енергоефективні або оптимізація графіків роботи обладнання.

У XXI столітті важливою тенденцією є перехід металургійної промисловості на більш екологічні джерела енергії. Підприємства дедалі частіше інвестують у розвиток власної генерації з відновлюваних джерел – сонячних, вітрових чи біоенергетичних установок, або укладають контракти на постачання «зеленої» енергії. Це дозволяє не лише зменшити вуглецевий слід, а й відповідати вимогам екологічних стандартів Європейського Союзу та міжнародних партнерів.

Таким чином, загальні засади енергоспоживання в металургійній промисловості сьогодні базуються на прагненні до раціонального використання енергоресурсів, підвищення ефективності виробництва, зниження екологічного навантаження та впровадження інновацій. Це є не просто відповіддю на економічні виклики, а й свідченням відповідального підходу до розвитку галузі в умовах глобальних змін. Тільки за умов активного впровадження сучасних технологій, ефективного управління та тісної співпраці з науковими колами металургійна галузь зможе залишатися конкурентоспроможною, стабільною та сталовою у майбутньому.

Перелік посилань

1. Кійко С.Г. *Планування енергоспоживання при реалізації портфеля проектів енергозбереження на металургійному підприємстві на базі предиктивної адаптації*. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020, 3(65)с.97-105. DOI: 10.30748/zhups.2020.65.15
2. Кійко С. Г. *Адаптивне управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійному підприємстві. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості.* 2020. № 4 (14).с.56-70. DOI: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.056

УДК 621.316.925

Ровенський О.О.
E-mail:rovenskyioleg7@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-0628-5188
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (Україна)

КОМПЕНСАЦІЯ ПРОВАЛІВ І ПЕРЕРВ ЖИВЛЕННЯ

Провали напруги та короткочасні перерви живлення є одними з найбільш поширених порушень якості електроенергії у промислових електромережах. Вони характеризуються короткочасним зниженням або повною відсутністю напруги в мережі, зазвичай на період від кількох мілісекунд до кількох секунд. Незважаючи на їхню коротку тривалість, ці явища мають серйозні наслідки для функціонування чутливого електрообладнання, систем автоматизації, контрольно-вимірювальної техніки та виробничих процесів у цілому. Тому розробка й впровадження заходів для компенсації таких порушень стає критично важливим елементом у забезпеченні безперервності електропостачання та стабільності технологічного циклу.

Основними джерелами провалів напруги є пуски потужних двигунів, короткі замикання в електромережі, зміни навантаження, аварії на енергообладнанні, а також дії захисної автоматики. Щодо перерв живлення, то вони зазвичай пов’язані з несправністю в мережах або роботі комутаційних пристроїв. Хоча багато сучасних підприємств оснащені системами аварійного перемикання або резервного живлення, навіть короткі паузи у живленні можуть призвести до порушення процесів, втрати даних, псування продукції або зупинки обладнання.

Для компенсації провалів напруги використовуються різноманітні технічні засоби, серед яких одне з провідних місць займають джерела безперебійного живлення (UPS). Ці пристрої забезпечують підтримку напруги на виході у заданих межах навіть за умов провалу або повного зникнення напруги в мережі. Сучасні UPS-системи мають високу швидкодію, здатні реагувати протягом кількох мілісекунд, що дозволяє уникнути зупинки чутливого обладнання. Особливо ефективними є подвійні інверторні системи (online UPS), які забезпечують безперервне перетворення енергії й дозволяють повністю ізолювати споживача від якості електроенергії в мережі.

Іншим поширеним методом є застосування систем динамічної стабілізації напруги (DVR - Dynamic Voltage Restorer). Ці пристрої підключаються паралельно до навантаження і при виявленні провалу напруги миттєво додають у мережу компенсуючий сигнал, зберігаючи напругу в заданому діапазоні. DVR забезпечує особливо ефективний захист для промислових ліній, де необхідна висока точність електроживлення.

Крім того, у промислових системах дедалі частіше впроваджуються комплексні рішення на основі акумулюючих систем (електрохімічних або суперконденсаторних), які здатні забезпечувати електропостачання упродовж десятків секунд або хвилин - достатньо для коректного завершення циклу або переходу на резервне живлення. Такі системи можуть працювати в тандемі з дизель-генераторними установками або мікромережами.

Автоматичні системи резервного живлення (АВР) також відіграють важливу роль у компенсації перерв. Вони забезпечують автоматичне перемикання з основної лінії живлення на резервну при виявленні обриву або зникнення напруги. Час реакції таких систем залежить від конфігурації мережі, але сучасні АВР здатні переключатися за 50–200 мс, що є достатнім для більшості некритичних навантажень.

Комплексний підхід до компенсації провалів і перерв живлення передбачає не лише встановлення захисного обладнання, а й аналіз вразливості виробничих процесів, визначення критичних зон, оптимізацію топології мережі, розробку сценаріїв енергозабезпечення на випадок надзвичайних ситуацій. У перспективі ефективним рішенням є впровадження інтелектуальних систем керування живленням (Power Management Systems), які на основі

даних з моніторингу здійснюють адаптивний розподіл ресурсів та попереджують перевантаження чи збої.

Таким чином, компенсація провалів і перерв живлення є важливою складовою стратегії підвищення надійності та енергоефективності промислових підприємств. Успішна реалізація цього завдання потребує поєднання технічних засобів, інженерної грамотності, системного моніторингу та стратегічного планування. Тільки такий підхід дозволяє мінімізувати втрати, захистити критичне обладнання й забезпечити безперервність виробничих процесів навіть за умов нестабільного енергоживлення.

Перелік посилань

1. IEC 61000-4-30:2015**.** *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.
2. *Power quality.* Available at: https://new.abb.com/low-voltage/launches/power-quality
3. Divya Soni, Upendra singh Tomar, Narottam Dutt Upadhyay *Grid Connected Wind Energy System Power Quality Improvement Using STATCOM.* International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT). Volume 3, Issue 2, September 2023.pp. 335-337. DOI: 10.48175/IJARSCT-13050

УДК 620.92:669

Володимир Васецький, студент
https://orcid.org/0009-0005-0483-8999
Запорізький національний університет, Запоріжжя, Україна

ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ

Вартість енергії є визначальним фактором конкурентоспроможності металургії. За даними World Steel Association, енергоносії формують 20–40% собівартості виробництва сталі [1]. Отже, навіть невелике підвищення енергоефективності прямо знижує витрати на виробництво і підвищує прибутковість. Підприємства, які впроваджують енергозберігаючі проекти, можуть досягти суттєвої економії: так, енергоощадні заходи часто окупаються за 1–3 роки за рахунок зменшення рахунків за паливо й електрику. Крім того, енергоефективність тісно пов'язана з екологічними платежами – менше споживання палива означає менше викидів CO_2 і, відповідно, нижчі витрати на квоти чи податки в рамках екологічного регулювання. Ціна енергоресурсів на ринках впливає на металургів глобально. 2021–2022 роки стали випробуванням для європейської галузі: стрімке зростання цін на газ та електроенергію призвело до зупинки частини сталеплавильних потужностей в ЄС [2]. Наприклад, восени 2022 р. витрати на енергію для деяких заводів зросли настільки, що місячний рахунок за енергію зрівнявся з річним у попередні роки [2]. Компанії були змушені скорочувати виплавку до 50% від потужності або тимчасово зупиняти електропечі [2]. Це викликало кризу пропозиції на ринку сталі та підвищення імпортної залежності Європи [2]. Таким чином, надвисокі ціни на енергоносії можуть стати екзистенційною загрозою для металургії навіть у розвинених країнах.

В Україні війна та обстріли енергетичної інфраструктури в 2022 році також спричинили дефіцит електроенергії, що змусило металургійні заводи тимчасово зупинятися і працювати за квотами споживання, впроваджуючи жорсткий режим енергозбереження. Ці екстремальні ситуації показують важливість стабільного енергозабезпечення та гнучкості виробництва до цінових шоків.

Інвестиції в енергоефективність та нові технології потребують значних коштів, але окупаються довгостроково через економію та "зелені" бонуси. За оцінками китайських дослідників, до 2030 року технічні заходи з підвищення енергоефективності в сталеливарній промисловості Китаю мають середню питомую вартість ~27 юанів за тонну у перерахунку на зменшення викидів, тоді як перехід на нові виробничі структури (наприклад, масовий перехід на електропечі або водневі технології) обійдеться набагато дорожче – ~703 юаня на тонну у вигляді граничних витрат [3]. Висока капіталоємність нових технологій є серйозним бар'єром для їх впровадження [3]. Саме тому багато компаній і країн виважено підходять до декарбонізації: спочатку максимально реалізують дешевші заходи енергоефективності, і лише тоді – дорогі трансформаційні проекти. Економічний аналіз свідчить, що без додаткових стимулів (дешеві кредити, субсидії, доходи від торгівлі вуглецевими квотами) бізнес може відкладати впровадження радикально нових технологій [3]. Включення металургії до системи торгівлі викидами та посилення екологічних вимог покликані вирівняти цю ситуацію, зробивши енергоефективні та низьковуглецеві технології економічно вигіднішими.

Водночас, енергоменеджмент стає частиною бізнес-стратегії металургійних компаній. Підприємства запроваджують стандарти ISO 50001, формують портфелі енергозберігаючих проектів, оцінюють їхню рентабельність. Деякі українські науковці пропонують методики управління такими проектами та адаптивного планування енергоспоживання на підприємствах [4, 5], що дозволяє науково обґрунтувати інвестиції в енергоефективність. Економія енергії розглядається не лише як спосіб знизити витрати, а і як засіб зменшити ризики волатильності цін та виконати екологічні нормативи. Таким чином, енергоспоживання

в металургії – це не лише технічний, але й економічний виклик: оптимальне управління енергією прямо впливає на фінансові результати і стійкість підприємств.

Перелік посилань

1. Energy use in the steel industry. Available at:https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Fact-sheet-Energy-use-in-the-steel-industry.pdf
2. *Steel makers fear deepening crisis from energy crunch as output halted*. Available at: https://www.reuters.com/business/energy/steel-makers-fear-deepening-crisis-energy-crunch-output-halted-2022-09-23/
3. Gu, Yueqing, Wenjie Liu, Bowen Wang, Borui Tian, Xinyue Yang, and Chongchao Pan. 2023. "*Analysis and Prediction of Energy, Environmental and Economic Potentials in the Iron and Steel Industry of China*" *Processes* 11, no. 12: 3258. https://doi.org/10.3390/pr11123258
4. Кійко С.Г. *Планування енергоспоживання при реалізації портфеля проектів енергозбереження на металургійному підприємстві на базі предиктивної адаптації*. Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил, 2020, 3(65)с.97-105. DOI: 10.30748/zhups.2020.65.15
5. Кійко С. Г. *Адаптивне управління портфелями проєктів енергозбереження на металургійному підприємстві. Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості.* 2020. № 4 (14).с.56-70. DOI: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2020.14.056

УДК 621.316.925

Ровенський О.О.
E-mail:rovenskyioleg7@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-0628-5188
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (Україна)

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА СТОРОНІ СПОЖИВАЧІВ

Управління якістю електроенергії на стороні споживача набуває все більшого значення в умовах зростаючої складності та чутливості електротехнічного обладнання, широкого впровадження автоматизованих систем, а також переходу до інтелектуального енергоспоживання. Раніше забезпечення параметрів якості електроенергії вважалося завданням енергопостачальника, проте сучасні умови експлуатації показують, що значна частина порушень формується або посилюється саме на стороні споживача. Відтак виникає необхідність у системному підході до управління якістю живлення безпосередньо на рівні підприємств, будівель, об'єктів інфраструктури.

До основних показників якості електроенергії, які підлягають контролю на рівні споживача, належать: відхилення напруги від номінального значення, провали та перенапруги, нестабільність частоти, наявність гармонічних складових (спотворення синусоїди), дисбаланс фаз, флікери (мерехтіння) та короткочасні перерви. Кожен з цих показників може спричинити порушення нормальної роботи обладнання, вплинути на термін його служби, точність керування та безперебійність технологічного процесу.

Ефективне управління якістю електроенергії на стороні споживача передбачає впровадження ряду взаємопов’язаних заходів. Першим етапом є моніторинг параметрів якості з використанням спеціалізованих пристроїв – аналізаторів якості електроенергії, які здатні реєструвати події у реальному часі, фіксувати перевищення допустимих меж, формувати звіти за тривалий період. Дані з таких пристроїв дозволяють виявити джерела порушень, зрозуміти динаміку спотворень і приймати обґрунтовані рішення щодо технічної корекції.

Наступним кроком є впровадження засобів корекції: стабілізаторів напруги, джерел безперебійного живлення (UPS), систем компенсації реактивної потужності, фільтрів гармонік (пасивних та активних), автоматів корекції фази та балансу. Наприклад, у разі наявності високого рівня гармонік ефективним буде застосування активного фільтра, який у реальному часі генерує протистоячий сигнал для компенсації небажаних частот. Якщо ж проблема полягає у провалах напруги або короткочасних перервах, то доцільним є встановлення UPS або DVR-систем.

Не менш важливою є організація правильного електроенергетичного господарства на об'єкті. Це включає коректний розподіл навантаження по фазах, застосування асиметричних трансформаторів при наявності однобічного навантаження, оптимізацію запусків електродвигунів (використання пристроїв плавного пуску), уникнення одночасного включення потужних споживачів. Проектування мережі із врахуванням впливу нелінійних навантажень також відіграє ключову роль у мінімізації внутрішніх джерел спотворень.

Системне управління якістю передбачає також інтеграцію з енергоменеджментом підприємства. Інформація з моніторингових систем повинна використовуватися не лише для технічного аналізу, а й для фінансового планування, оцінки втрат від порушень, оптимізації тарифних навантажень, планування технічних заходів з підвищення ефективності. Управління якістю електроенергії стає одним із важливих елементів загальної стратегії сталого розвитку виробництва.

З огляду на підвищення вимог до безперебійності, точності та енергоефективності, якість електроенергії перетворюється на критичний інфраструктурний параметр. Тому кожен споживач – від малих підприємств до великих індустріальних комплексів – повинен мати чітко визначену політику у сфері якості енергопостачання, яка охоплює як технічні, так і організаційні аспекти.

Таким чином, управління якістю електроенергії на стороні споживача – це багаторівнева задача, що включає моніторинг, діагностику, технічну корекцію та стратегічне планування. Її реалізація дозволяє не лише захистити обладнання від пошкоджень, а й знизити витрати на обслуговування, уникнути аварійних зупинок, підвищити загальну енергоефективність підприємства та забезпечити стабільність виробничого процесу.

Перелік посилань

1. IEC 61000-4-30:2015**.** *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.
2. *Power quality.* Available at: https://new.abb.com/low-voltage/launches/power-quality
3. Divya Soni, Upendra singh Tomar, Narottam Dutt Upadhyay *Grid Connected Wind Energy System Power Quality Improvement Using STATCOM.* International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT). Volume 3, Issue 2, September 2023.pp. 335-337. DOI: 10.48175/IJARSCT-13050

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

РОЛЬ ВИЩИХ ГАРМОНІК У ФОРМУВАННІ «ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ» ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Світ сучасних технологій дедалі активніше пов'язаний із високими вимогами до якості електроенергії. Промисловість, що швидко розвивається, усе частіше використовує складні електронні системи, чутливі до найменших змін характеристик мережі. У цьому контексті проблема електромагнітного забруднення набуває особливої актуальності. І хоча саме поняття "електромагнітного забруднення" ще відносно нове в широкому вжитку, його наслідки ми спостерігаємо щодня - у зниженій надійності техніки, у неочікуваних зупинках виробничих процесів, у збільшенні кількості відмов устаткування.

Ключову роль у формуванні електромагнітного забруднення відіграють вищі гармоніки**.** Це не якісь абстрактні фізичні величини - це цілком реальні складові напруги та струму, що щодня циркулюють у мережах підприємств. Із кожним роком їх кількість і вплив лише зростають. Сьогодні ми стоїмо перед завданням не лише розуміти природу вищих гармонік, але й активно впроваджувати рішення для мінімізації їх шкідливого впливу.

Появу вищих гармонік можна порівняти із домішками у чистій воді. В ідеальній електричній мережі напруга і струм мають бути синусоїдальними, чіткими і передбачуваними. Але реальність далека від ідеалу. Майже кожен пристрій, який ми підключаємо до мережі - від великого частотного перетворювача до скромного світлодіодного світильника - вносить свої спотворення. Струм і напруга деформуються, а з часом мережа перетворюється на складний конгломерат сигналів різної частоти. Найбільш поширеними джерелами вищих гармонік у промисловості є перетворювачі частоти, імпульсні блоки живлення, безперебійники, електродугові печі, а також зварювальні апарати. Кожен із цих пристроїв працює за власними фізичними законами, але об'єднує їх одне - внесення небажаних частотних компонентів у загальну мережу.

Процес формування електромагнітного забруднення виглядає як розповсюдження невидимих електромагнітних хвиль. Струмові гармоніки додатково нагрівають кабелі та трансформатори. Напругові гармоніки змінюють форму напруги, що подається на інші пристрої, змушуючи їх працювати в умовах, до яких вони не пристосовані. А електромагнітне випромінювання проникає в простір довкола мережі, створюючи завади для зв'язку, керуючих систем і навіть побутових приладів. Інколи мережі поводяться ще небезпечніше: виникає резонанс гармонік. У такі моменти певні гармонічні складові різко підсилюються, створюючи перевантаження, перенапруги й фактично вибухову загрозу для ізоляції кабелів або обмоток трансформаторів.

Наслідки такого забруднення в промислових мережах помітні практично одразу. У обладнання знижується термін служби через підвищене теплове навантаження. Системи релейного захисту починають працювати нестабільно: іноді вони хибно спрацьовують, а іноді навпаки - не спрацьовують тоді, коли потрібно. Чутлива електроніка - контролери, комп'ютери, модулі автоматизації - починає "збоїти", вносячи хаос у технологічні процеси. Виробництва зазнають фінансових втрат через зупинки, простій обладнання та ремонтні роботи. І це ще не повний перелік проблем. Електромагнітне забруднення поступово знижує загальну енергоефективність підприємства. Кожен відсоток додаткових втрат енергії означає більші рахунки за електроенергію і менший конкурентний потенціал виробництва.

Чи є рішення цієї проблеми? Так. Сучасна техніка пропонує чимало методів боротьби з гармонічними спотвореннями. Пасивні фільтри - прості LC-ланцюги - допомагають ефективно поглинати найбільш шкідливі гармоніки. Більш складні активні фільтри аналізують мережеві спотворення в реальному часі і створюють компенсаційні струми, нейтралізуючи

шкідливі частоти. Крім цього, варто вже на етапі проєктування мережі приділяти увагу вибору обладнання. Використання пристроїв із низьким рівнем гармонік, правильне компонування мережі, уникнення можливих LC-резонансів - усе це в комплексі дозволяє зменшити вплив вищих гармонік.

Не слід забувати і про регулярний моніторинг стану мережі. Спеціальні аналізатори якості електроенергії допомагають фіксувати рівень гармонічних спотворень, виявляти критичні точки та своєчасно вживати заходів для запобігання аваріям. І нарешті, важливу роль у боротьбі з електромагнітним забрудненням відіграє дотримання міжнародних стандартів. Документи на кшталт IEEE 519-2014 або IEC 61000-4-7 чітко регламентують допустимі рівні гармонік і пропонують методи їхнього вимірювання та обмеження. Вищі гармоніки давно перестали бути лише темою для теоретичних досліджень - вони перетворилися на реальний виклик для промисловості. Без ефективного контролю гармонічних спотворень неможливо забезпечити стабільну роботу підприємств, знизити втрати енергії і гарантувати безпеку технологічних процесів.

Електромагнітне забруднення промислових мереж - це не тільки проблема додаткових втрат енергії, а й питання стійкості всього виробництва. І кожен крок у напрямку його мінімізації - це внесок у розвиток ефективної, безпечної та надійної промисловості майбутнього.

Тому сьогодні, коли промислові об'єкти стають дедалі складнішими і технологічнішими, комплексний підхід до боротьби з вищими гармоніками - від правильного вибору обладнання до постійного моніторингу стану мереж - є не просто бажаним, а життєво необхідним.

Перелік посилань

1. IEEE. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (IEEE Std 519-2014). IEEE Standards Association. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
2. EC. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto* (IEC 61000-4-7:2002). International Electrotechnical Commission. Доступно за адресою: https://webstore.iec.ch/publication/4226

УДК 621.316.925

Шевчук Леонід Ігорович – студент кафедри електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна, https://orcid.org/0009-0004-1369-7342

ГЕНЕРАЦІЯ ТА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ У ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

У сучасних промислових електричних мережах якість електроенергії є визначальним чинником ефективної, безпечної та надійної роботи технологічного обладнання. Одним із найбільш складних і поширених типів порушень цієї якості є гармонічні спотворення, які виникають через наявність у мережі складових сигналу, частоти яких кратні основній (гармоніки). Їх поява та подальше розповсюдження в промислових системах безпосередньо пов'язані з широким використанням нелінійного електротехнічного обладнання, яке змінює синусоїдальний характер струмів і напруг.

Генерація гармонічних складових є наслідком нелінійної взаємодії споживачів із системою електропостачання. Зокрема, імпульсні джерела живлення, частотні перетворювачі, електрозварювальні апарати, дугові печі, світлодіодне освітлення та системи безперебійного живлення є основними джерелами гармонік. У результаті їх роботи синусоїдальна форма струму порушується, і в спектрі з'являються гармоніки 3, 5, 7 та вищих порядків. Чим складніша і технологічно насиченіша система - тим вищий рівень гармонічного забруднення, що вимагає особливої уваги до моніторингу.

Оскільки гармоніки генеруються на рівні окремих пристроїв, але поширюються через усю мережу, вони мають системний вплив. Гармонічні складові розповсюджуються по трансформаторах, кабельних лініях, шинопроводах, створюючи "гармонічне навантаження" на елементи системи. Особливо небезпечними є ситуації резонансу, коли певна частота гармоніки співпадає з власною частотою мережевого кола - це може призвести до різкого зростання напруги або струму в окремих точках, що загрожує перегрівом, прискореним зношенням або пошкодженням обладнання.

Крім технічних загроз, гармоніки спричиняють зростання енергетичних втрат. Внаслідок наявності вищих частот опір провідників зростає, що збільшує теплові втрати в кабелях, трансформаторах і двигунах. Водночас, через спотворення сигналу, можуть некоректно працювати автоматичні захисти, вимикачі та релейні пристрої, що збільшує ймовірність аварій або хибних спрацювань. Додаткові витрати виникають також на технічне обслуговування та прискорене оновлення техніки.

Ще однією проблемою є перекручення даних, що надходять від контрольно-вимірювальних приладів. За умов значного рівня гармонік зростає ймовірність похибок у вимірюваннях активної, реактивної та повної потужності, що ускладнює точну оцінку енерговитрат та розрахунки з енергопостачальниками. Ситуація погіршується, коли підприємство застосовує власні генеруючі установки або інтегрує джерела відновлюваної енергії - такі системи можуть як поглинати, так і генерувати гармоніки, змінюючи динаміку процесів.

Оцінка гармонічного стану мережі здійснюється шляхом аналізу показника THD (Total Harmonic Distortion) - коефіцієнта загального гармонічного спотворення. Відповідно до стандарту IEEE 519-2014, допустимий рівень THD для напруги в розподільчих мережах зазвичай не повинен перевищувати 5%, тоді як для струму ці межі залежать від співвідношення навантаження до короткозамикальної потужності у точці приєднання. Для дотримання цих норм потрібен постійний контроль параметрів мережі та цілеспрямоване проектування систем енергозабезпечення.

Для мінімізації впливу гармонічних складових на мережу застосовують низку технічних рішень. Серед них - пасивні фільтри (LC-контури, настроєні на частоти домінуючих гармонік), активні фільтри, які автоматично формують компенсаційні сигнали, дроселі, спеціалізовані трансформаторні з'єднання (зірка-трикутник, зсунуті обмотки) та правильна

топологія електричних кіл. Важливим також є рівномірний розподіл нелінійних навантажень по фазах і обмеження їх кількості в одній секції.

Значну роль у системному підході до управління якістю електроенергії відіграють цифрові системи моніторингу - аналізатори якості, SCADA-платформи та пристрої захисту з функцією реєстрації гармонічного спектра. Вони дозволяють у реальному часі фіксувати порушення, збирати статистику, формувати аналітичні звіти та автоматично запускати алгоритми реагування - наприклад, підключення фільтрів або переведення навантажень.

Усі ці заходи не лише знижують ризики, але й сприяють підвищенню загальної енергоефективності підприємства, зниженню витрат на електроенергію та технічне обслуговування. У довгостроковій перспективі це формує енергетично стабільне середовище, в якому технологічні процеси мають мінімальну залежність від якості зовнішнього електропостачання.

Отже, гармонічні складові є невід'ємною складовою сучасних електроенергетичних систем, особливо в промисловому секторі. Їх генерація і розповсюдження становлять серйозну проблему, що потребує не лише технічних рішень, а й стратегічного планування, стандартів, системного моніторингу та культури відповідального споживання. Тільки у поєднанні цих підходів можна досягти стабільної та ефективної роботи електроенергетичної системи у швидко змінному технічному середовищі.

Перелік посилань

1. Кириленко О. В. Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України, Електродинаміка: Зб. наук. пр.– К.: ІЕД НАН України, 2001.– С. 87−91.

2. Качан Ю. Г., Николенко А. В., Кузнєцов В. В. Про кількісну оцінку якості електричної енергії в мережах промислових підприємств // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – Вип. 84. – Дніпро, 2010. – С. 9–16.

3. Качан Ю. Г., Дяченко В. В., Кузнєцов В. В. Засоби ефективного використання електричної енергії: монографія / Запорізька державна інженерна академія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 156 с.

УДК 621.316.925

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

АКТИВНІ ФІЛЬТРИ ГАРМОНІК ВИЩИХ ЧАСТОТ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Проблема забезпечення високої якості електроенергії у промислових та комерційних мережах залишається однією з найактуальніших у сучасній енергетиці. Зі збільшенням використання нелінійних електронних пристроїв, перетворювачів частоти, імпульсних джерел живлення та іншого обладнання, спостерігається зростання рівня гармонічних спотворень у системах електропостачання. Вищі гармоніки, породжені такими навантаженнями, значно погіршують форму напруги та струму, що негативно впливає на надійність роботи обладнання, викликає додаткові теплові втрати, знижує ефективність використання електроенергії та скорочує термін служби елементів електротехнічних систем.

Активні фільтри гармонік вищих частот є одними з найбільш ефективних технічних засобів для усунення цього виду спотворень. Принцип їхньої роботи полягає у реальному часі у створенні компенсуючого струму, який має таку ж амплітуду, але протилежну фазу відносно струму гармонічного спотворення. Завдяки цьому відбувається суттєве зниження рівня гармонік у мережі, а форма струму наближається до ідеальної синусоїди. Це, у свою чергу, сприяє стабілізації режимів роботи обладнання, зменшенню навантажень на трансформатори і кабельні лінії, покращенню показників якості електропостачання.

Особливістю активних фільтрів є їхня здатність одночасно компенсувати гармоніки кількох порядків, адаптуватися до змін у навантаженні та автоматично підтримувати задані параметри компенсації незалежно від динаміки роботи системи. Використання потужних цифрових процесорів сигналів і високошвидкісних алгоритмів аналізу забезпечує оперативність реагування на зміни в мережі, що робить активні фільтри особливо ефективними в умовах змінних режимів роботи підприємств.

На практиці встановлення активних фільтрів гармонік дозволяє знизити загальний рівень гармонічних спотворень THD (Total Harmonic Distortion) до рівня, що відповідає вимогам міжнародних стандартів, зокрема IEEE 519-2014 та IEC 61000-4-7. Крім компенсації вищих гармонік, багато сучасних моделей активних фільтрів також виконують функції компенсації реактивної потужності, корекції асиметрії фаз, зменшення флікеру та стабілізації напруги, що дозволяє комплексно вирішувати завдання покращення якості електроенергії.

Економічна ефективність впровадження активних фільтрів гармонік проявляється у зменшенні споживання електроенергії за рахунок зниження втрат у трансформаторах і лініях електропередачі, зниженні витрат на обслуговування та ремонт обладнання, збільшенні часу безаварійної роботи підприємств. Крім того, покращення якості електроенергії сприяє забезпеченню високої стабільності технологічних процесів, що є критичним для багатьох галузей промисловості.

Вибір типу активного фільтра гармонік та його параметрів базується на аналізі спектрального складу струмів навантаження, рівня загального гармонічного спотворення, потужності системи та конкретних технічних вимог підприємства. Оптимальне проектування системи компенсації забезпечує максимальну ефективність з мінімальними витратами.

Таким чином, активні фільтри гармонік вищих частот є важливим елементом стратегії підвищення енергоефективності, надійності та економічної ефективності сучасних електроенергетичних систем. Їх впровадження дозволяє вирішувати комплекс проблем, пов'язаних із якістю електроенергії, та формувати основу для стабільного розвитку енергетичної інфраструктури підприємств.

Перелік посилань

3. W. Jian, L. Xiaomeng, X. Dianguo and D. Guangren, "Parameter design and multi-objective optimization of shunt active filter switching harmonic filter based on genetic algorithm," *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, China, 2011, pp. 1562-1567, doi: 10.1109/ICECC.2011.6066445.
4. A. S. Ray and A. Bhattacharya, "A noble transformer coupled shunt active hybrid power filter," *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Seville, Spain, 2015, pp. 2571-2579, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125477.
5. IEEE Standards Association. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014)*. IEEE, 2014. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710

УДК 534.141+621.3:62-83

Олексій ЯЛАНСЬКИЙ, доцент кафедри електропривода
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
Володимир БРІЖЕНЮК, аспірант кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки
Євген КРИВЕНКО, аспірант кафедри охорони праці, цивільної та техногенної безпеки
Український державний університет науки і технологій

ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПРЯМИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ

Поточний стан енергосистеми України, а також сучасні тенденції розвитку технологій, машин і устаткування змушують шукати енергоощадні і ефективні рішення навіть для машин малої та середньої потужності. Закон України «Про функціонування паливно-енергетичного комплексу в особливий період» визначає одним з основних інженерно-технічних заходів підготовки підприємств для роботи в особливий період «упровадження сучасних енергозберігаючих та інформаційних технологій». Енергозбереження та технологічна ефективність також є одним з вагомих резервів підвищення економічної ефективності підприємств.

В переважній більшості вібраційних машин для збудження механічних коливань використовуються приводи з електричною машиною обертального руху, редуктором, передачею та механізмом перетворення обертального руху на коливальний (хитання, прямолінійний або пласко-паралельний рух). В різних машинах комбінація ланок цього ланцюга передачі та перетворення руху може варіюватися. Електропривод або нерегульований, або регульований з низькою якістю керування і кількістю регульованих величин від однієї до трьох в деяких випадках. Такі системи привода характеризуються рядом суттєвих недоліків, серед яких: значна маса передачі та неможливість зміни параметрів коливань, характер яких визначається конструктивно кінематикою механізму перетворення руху. Таким чином, найслабшою ланкою є саме цей механізм. Прямий керований привод (генератор-збуджувач коливань) дозволяє виключити цю ланку і не тільки позбутися зазначених недоліків, а й покращити технологічні характеристики вібраційної машини, а також розширити сферу застосування такого привода.

Енергетична та технологічна ефективність роботи вібраційних машин визначається якістю збуджуваних коливань робочого органа установки. Зокрема характер коливального процесу впливає на продуктивність транспортно-технологічного обладнання, на ефективність вібраційного грохочення, змішування, тощо. А для деяких видів машин параметри коливань робочого органа та керованість і повторюваність є визначальною характеристикою (наприклад, для випробувальних стендів, фармацевтичного та медичного обладнання, наукового приладдя, тощо). Тому актуальними є задачі

1. Уточнення динамічних моделей типових вібраційних машин;
2. Розробки та впровадження нових кінематичних схем та механізмів для вібраційних машин;
3. Розробки та впровадження керованого електропривода робочих органів вібраційних машин, нових методів та алгоритмів автоматичного керування рухом вібраційних збуджувачів з метою отримання полічастотних та хаотичних коливань, лінійних хвиль та хвилевих полів із заданими амплітудними та частотними характеристиками з дотриманням метрологічних вимог.

Також прямий електричний привод може бути використаний для збудження нормованих коливань в системах віброакустичної діагностики конструкцій та їх елементів як на підприємствах енергетики, так і в промисловому та цивільному будівництві. Визначеність параметрів коливань забезпечує високу селективність контролю та високу повторюваність

результатів в спробах, а значить достовірність результатів контролю, надійність і обґрунтованість висновків та рекомендацій.

«Прямим приводом» будемо вважати електропривод, в якому робочий орган машини закріплений: а) безпосередньо на валу двигуна або на вихідному валу редуктора; б) на валу, який приєднаний до вала двигуна або вихідного вала редуктора жорсткою муфтою; або в) на жорсткому важелі, що приєднаний до такого вала. При цьому в ідеальній моделі (без урахування люфтів та жорсткостей проміжних елементів) будь-яке положення робочого органа машини однозначно відповідає положенню якоря або ротора приводного двигуна, а проміжні ланки працюють як трансмісія, тобто слугують лише для передачі руху, зусилля та енергії від двигуна до робочого органу, але не формують траєкторію його руху. Траєкторію руху робочого органу формує безпосередньо система керування електропривода.

Концепція виключення передатного механізму з використанням прямого привода дозволяє: а) спростити кінематичну схему машини і у зв'язку з цим: б) підвищити надійність вібраційних машин та покращити їх ремонтопридатність, спростити обслуговування та збільшити інтервали між виконанням періодичних ТО; в) зменшити масу рухомих частин машини, її інерційність та динамічні навантаження на вузли і електродинамічні навантаження на силову частину електричної схеми машини; г) покращити керованість машини та реалізувати нові закони керування, неможливі для класичних вібраційних машин. Цей комплекс переваг забезпечує високу енергетичну та технологічну ефективність вібраційних машин з прямим приводом.

Функціональна схема лабораторної установки наведена на рис. 1. Установка генератора складається з ПЛК Modicon M241CEC24T/M (4), перетворювача сервопривода Lexium LXM05AD10M2 (12), електродвигуна BSH0701P01A2A (13) з енкодером (14) та панелі ЛМІ Magelis XBTGT2120 (9). Кнопковий пульт керування з емуляцією кінцевих вимикачів та потенціометрами аналогових входів, перетворювач та двигун встановлені на стійці, яка кріпиться до станини швидкоз'ємними затискачами WURTH.

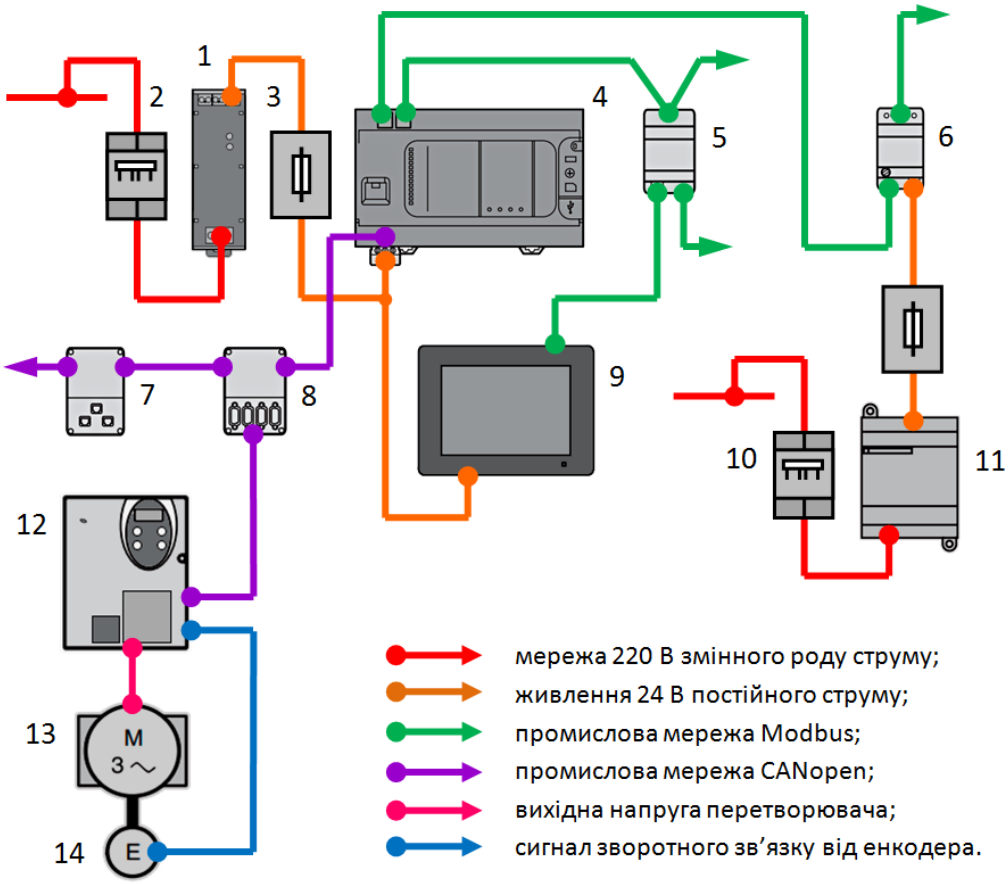


Рис. Функціональна схема лабораторної установки.

На рисунку показані: 1, 11 – блоки живлення, 2, 10 – автоматичні вимикачі; 3 – запобіжник; 5 – пристрій розгалуження промислової шини Modbus без опторозв'язування, 6 – пристрій розгалуження промислової шини Modbus з опторозв'язуванням та окремим живленням, 7, 8 – пристрої розгалуження промислової мережі CANopen.

Виконано практичну апробацію генератора механічних коливань на основі гармонічного синтезу. Для цього лабораторна установка запущена в режимах: відтворення першої гармоніки та обертонів (чисті синусоїди до 9-ї гармоніки); синтезу та відтворення насиченого обертонами періодичного сигналу (9, 12 та 16 гармонік); синтезу та відтворення типових впливів (прямокутний меандр шпаруватістю 2, несиметрична пила та симетричний трикутний сигнал); генерування сигналів динамічного хаосу за моделями Рьослера, Рікітакі, Нозе-Гувера, Ван дер Поля та Лоренца. Лабораторний експеримент підтвердив працездатність генератора та відповідність очікуваним технічним характеристикам.

Висновок.

Заміна відомих кінематичних схем привода вібраційних машин на прямий керований електропривод дозволяє а) спростити конструкцію і зменшити масогабаритні показники машин; б) збуджувати коливання із заданими спектральними і динамічними параметрами, що дозволяє значно покращити енергетичну та технологічну ефективність. Розроблені моделі, алгоритмічне та програмне забезпечення, виготовлений та апробований в лабораторних умовах генератор механічних коливань. Подальший розвиток концепції полягає у збільшенні потужності та динамічних характеристик електроприводів для таких машин, що може бути досягнуто використанням двох або кількох електроприводів, робота яких синхронізована для: а) підсилення; б) гармонічного синтезу; в) імпульсного впливу; г) формування коливань згину; д) суперпозиції коливань. Запропонований генератор механічних коливань також апробований в автоматизованій системі контролю безпеки будівель і споруд в підсистемі віброакустичної діагностики конструкцій і масивів.

Список літератури

1. Про функціонування паливно-енергетичного комплексу в особливий період: Закон України від 02.11.2006 р. № 307-V. Дата оновлення: 01.01.2022. URL: ttps://zakon.rada.gov.ua/laws/show/307-16

2. Яланський О.А, Барабанов С.С. Генератор механічних коливань із заданими спектральними параметрами для вібраційних машин та діагностичного устаткування з прямим електричним приводом. Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації: : тези доп. міжн. наук.-техн. конф. (м. Кременчук, 16 – 17 трав. 2024 р.). Кременчук, 2024. С. 99 – 100.

УДК 621.316.925

Піліпенко В.О., провідний фахівець Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна
e-mail: pilipenko992@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-7301-2501
Playtika Holding Corp, Дніпро, Україна

ПРОБЛЕМАТИКА ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЕНЕРГОПОСТАЧАННІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

У сучасній промисловості питання якості електроенергії набуває першорядного значення. Розвиток автоматизації, використання високочутливої електроніки, широке застосування частотних перетворювачів, імпульсних джерел живлення та інших нелінійних навантажень призводить до суттєвих змін у характері електричних процесів у мережах. Одним із найбільш важливих факторів, що впливають на стабільність та надійність енергопостачання, є проблема вищих гармонік.

Вищі гармоніки - це компоненти електричних сигналів, частоти яких кратні основній частоті мережі. Ідеальною вважається синусоїдальна форма напруги та струму з частотою 50 Гц, однак у реальних умовах через вплив різних споживачів ця форма викривлюється. Причиною появи гармонік є нелінійна залежність споживаного струму від напруги у різноманітних пристроях. До таких пристроїв належать перетворювачі частоти, випрямлячі, імпульсні блоки живлення, електродугові печі, системи зварювання та інше промислове обладнання.

З точки зору фізичних процесів, спотворення форми сигналу призводить до утворення великої кількості вищих гармонік, які циркулюють по мережі разом з основним сигналом. Їх присутність змінює електромагнітні умови в мережі, що проявляється підвищенням втрат енергії, нагрівом елементів системи, виникненням перенапруг, електромагнітного випромінювання та порушенням коректної роботи чутливої техніки.

Проблема ускладнюється тим, що багато промислових об'єктів не спроектовані для роботи в умовах значних гармонічних спотворень. Обладнання, розраховане на синусоїдальну напругу, в умовах деформованої напруги зазнає додаткових навантажень, що скорочує його строк служби і підвищує ризик аварій. Трансформатори, кабелі, двигуни змушені працювати в умовах підвищених теплових втрат, що призводить до їх перегріву і, зрештою, до виходу з ладу.

Наявність вищих гармонік впливає також на функціонування релейного захисту та систем автоматики. Багато релейних пристроїв орієнтовані на роботу з чистими синусоїдальними сигналами. Гармонічні спотворення можуть викликати як помилкові спрацювання захисту, так і його неспрацьовування у відповідальний момент. Це створює додаткові ризики для безпечної експлуатації електротехнічних установок.

Ще одним важливим наслідком є підвищення рівня електромагнітного випромінювання. Вищі гармоніки утворюють високочастотні компоненти, які можуть створювати завади роботі інформаційних систем, засобів зв'язку, промислових контролерів і навіть медичного обладнання. Це явище відоме як електромагнітне забруднення і сьогодні є серйозною проблемою для великих підприємств.

Практичний досвід свідчить, що вищі гармоніки здатні призводити до значних економічних збитків. Зниження ефективності використання електроенергії, зростання витрат на обслуговування та ремонт обладнання, втрати продуктивності через зупинки виробничих процесів - усе це є прямими наслідками недооцінки гармонічних спотворень.

Враховуючи масштаби проблеми, було розроблено і впроваджено низку технічних рішень для контролю та мінімізації рівня гармонік. Одним із основних напрямів є встановлення пасивних і активних фільтрів гармонік. Пасивні фільтри - це елементи LC-структури, які налаштовані на поглинання енергії на певних частотах. Активні фільтри аналізують параметри мережі в реальному часі і компенсують шкідливі гармоніки шляхом генерації відповідних протифазних струмів.

Крім того, до заходів боротьби із гармоніками належать: використання спеціальних трансформаторів із зсувом фаз; встановлення реакторів для обмеження циркуляції гармонік; застосування обладнання із низьким рівнем генерації гармонічних спотворень; правильне компонування електричних мереж для уникнення умов резонансу.

Значну роль у контролі за якістю електроенергії відіграє моніторинг. Системи постійного моніторингу дозволяють у режимі реального часу відслідковувати параметри мережі, виявляти зростання рівня гармонік та своєчасно вживати заходів для їх обмеження. Таким чином, моніторинг не лише дозволяє оцінювати поточний стан мережі, але й запобігає виникненню аварійних ситуацій.

Варто підкреслити, що регулювання гармонічних спотворень здійснюється відповідно до міжнародних стандартів. Стандарт IEEE 519-2014 встановлює допустимі межі рівня вищих гармонік у промислових мережах, а стандарт IEC 61000-4-7 визначає методи їх вимірювання та оцінювання. Дотримання цих норм є обов'язковим для підприємств, що прагнуть досягти високої надійності і енергоефективності своїх енергосистем.

Розв'язання проблеми вищих гармонік вимагає комплексного підходу. Недостатньо встановити лише один фільтр або модернізувати окремий сегмент мережі. Необхідно розглядати всю енергосистему в цілому, враховуючи характер навантаження, структуру мережі, режими роботи обладнання. Лише тоді можна забезпечити тривалу стабільну роботу промислових об'єктів.

У перспективі проблема гармонічних спотворень буде лише загострюватися. Зростання обсягів електротранспорту, збільшення використання відновлюваних джерел енергії, розвиток технологій швидкісної зарядки і масове застосування електронних пристроїв вимагають нових підходів до забезпечення якості електроенергії. Тому питання контролю за вищими гармоніками стає стратегічно важливим для підприємств, які планують розвиватися в умовах нової енергетичної реальності.

Підсумовуючи вищезазначене, слід наголосити: вищі гармоніки є об'єктивною складовою сучасного енергоспоживання, і їх вплив не може бути ігнорований. Від ефективності боротьби з гармонічними спотвореннями залежить надійність технологічних процесів, тривалість експлуатації обладнання, енергоефективність підприємств і загальна стабільність виробництва. Формування культури енергоменеджменту, підвищення обізнаності інженерів та впровадження технічних рішень на всіх етапах проєктування та експлуатації електричних мереж є ключовими умовами успішного розвитку сучасної промисловості.

Перелік посилань

3. IEEE. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems* (IEEE Std 519-2014). IEEE Standards Association. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
4. EC. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto* (IEC 61000-4-7:2002). International Electrotechnical Commission. Доступно за адресою: https://webstore.iec.ch/publication/4226
5. Supriya Jaiswal and Makarand S. Ballal, "A method for fixing harmonic injection share of utility or consumer or both at the point of energy metering", *IET Generation Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 16, pp. 3803-3811, 2018.

УДК 621.316.925

Шевчук Леонід Ігорович – студент кафедри електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна, https://orcid.org/0009-0004-1369-7342

ПРОБЛЕМИ ПЕРЕНАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІД ДІЄЮ ВИЩИХ ГАРМОНІК

У промислових та енергетичних електричних мережах трансформатори є критично важливими вузлами, що забезпечують адаптацію рівнів напруги для потреб різноманітних споживачів. Традиційно трансформатори проєктуються для роботи з синусоїдальними струмами та напругами, тобто в умовах так званого «чистого» енергопостачання. Однак із розвитком сучасної техніки й активним використанням нелінійних навантажень, таких як частотні перетворювачі, джерела безперебійного живлення, електрозварювальне обладнання, імпульсні джерела живлення та електропечі, структура струмів, що протікають через трансформатор, суттєво змінилася. Результатом цього стало зростання рівня вищих гармонік, які істотно впливають на тепловий режим, втрати потужності, механічне зношення та електромагнітну сумісність трансформаторів.

Під вищими гармоніками розуміють струми або напруги, частоти яких кратні основній (наприклад, 3-я, 5-а, 7-а гармоніка відносно 50 Гц). Вони з'являються у разі нелінійної залежності між струмом і напругою на навантаженні, що є типовим для великої кількості сучасних споживачів. У випадку трансформатора це означає, що його обмотки змушені працювати в умовах дії змінного струму складної форми, що призводить до непередбачених втрат і теплових навантажень.

Гармонічні струми мають декілька каналів негативного впливу на трансформатор. По-перше, вони збільшують загальний рівень струму, що призводить до зростання втрат потужності в обмотках (I^2R втрати), а отже – до нагрівання. По-друге, струми вищих частот спричиняють скін-ефект і ефект близькості, що змінює розподіл струму в провідниках, збільшуючи локальні втрати. По-третє, магнітопровід трансформатора зазнає впливу частот, для яких він не оптимізований, що призводить до додаткових втрат на гістерезис і вихрові струми в осерді.

Особливо чутливими до дії вищих гармонік є трансформатори з трикутним з'єднанням обмоток. Вони часто стають каналом циркуляції гармонік третього порядку, які не компенсуються в мережі. Такі струми утворюють внутрішній контур усередині трансформатора, і хоча зовнішньо навантаження здається номінальним, фактичні втрати та теплове навантаження можуть перевищувати припустимі межі. Це часто є причиною невидимого, але прогресуючого старіння трансформатора, яке виявляється лише при деградації ізоляції або аварії.

Слід також розуміти, що наявність гармонік викликає підвищення вібрації трансформатора, шуму, а також електромагнітного випромінювання, що погіршує умови роботи як самого обладнання, так і навколишніх систем. У цифрових підстанціях це може порушувати роботу контролерів, релейного захисту або створювати помилки в роботі автоматизованих систем керування. Крім того, тривалий перегрів призводить до окислення трансформаторної оливи, втрати її ізоляційних властивостей і деградації паперової ізоляції обмоток, що прямо скорочує ресурс трансформатора.

У міжнародній практиці для кількісної оцінки впливу гармонік на трансформатор застосовується так званий K-фактор. Він показує, наскільки більше втрат тепла виникає в трансформаторі під дією гармонічних струмів порівняно з синусоїдальним струмом такої ж діючої величини. Для критичних застосувань використовуються трансформатори з підвищеним K-фактором (наприклад, K-13, K-20), які мають відповідну термостійкість, змінену геометрію обмоток, підсилене охолодження та покращену ізоляцію. Їх застосування доцільне у середовищі із високим рівнем гармонік, наприклад, у центрі обробки даних, промислових системах із великою кількістю перетворювачів або у медичних установах.

Важливо не лише правильно підібрати трансформатор, але й оцінити рівень гармонік у мережі. Для цього застосовуються аналізатори якості електроенергії, які дозволяють відстежувати THD (Total Harmonic Distortion), визначати спектр гармонік, їх зміну в часі та вплив на кожну фазу окремо. На основі таких даних приймаються рішення про встановлення пасивних фільтрів (LC-контурів), активних фільтрів гармонік, а також коригується схема підключення нелінійних навантажень.

На етапі проектування нових систем або модернізації існуючих, критично важливо враховувати можливість перенавантаження трансформаторів унаслідок впливу гармонік. Ігнорування цієї проблеми на етапі техніко-економічного обґрунтування може призвести до непрогнозованих втрат у найближчому майбутньому. Крім того, у багатьох країнах запроваджені нормативні обмеження на рівень гармонічних спотворень, і перевищення допустимих значень може призвести до штрафів або обмеження живлення.

Таким чином, проблема перенавантаження трансформаторів під дією вищих гармонік є не лише технічним, а й економічним та стратегічним викликом для сучасної енергетики. Вона вимагає комплексного підходу, який включає моніторинг, адаптивне проєктування, правильний вибір обладнання, впровадження фільтраційних рішень та нормативний контроль. Тільки такий підхід дозволить зберегти ресурс трансформаторного парку, підвищити енергоефективність підприємств і забезпечити стабільну роботу мереж у динамічно змінному технічному середовищі.

Перелік посилань

1. Кириленко О. В. Моделювання енергетичних процесів у системах енергопостачання при вирішенні завдань енергозбереження / О. В. Кириленко, С. П. Денисюк // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України, Електродинаміка: Зб. наук. пр.– К.: ІЕД НАН України, 2001.– С. 87−91.

2. Качан Ю. Г., Николенко А. В., Кузнєцов В. В. Про кількісну оцінку якості електричної енергії в мережах промислових підприємств // Гірнича електромеханіка та автоматика: науково-технічний збірник. – Вип. 84. – Дніпро, 2010. – С. 9–16.

3. Качан Ю. Г., Дяченко В. В., Кузнєцов В. В. Засоби ефективного використання електричної енергії: монографія / Запорізька державна інженерна академія. – Запоріжжя: ЗДІА, 2016. – 156 с.

УДК 621.316.92

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

ВПЛИВ НЕРІВНОМІРНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Якість електроенергії є одним із ключових показників ефективності роботи енергетичних систем, що визначає стабільність та надійність електропостачання споживачів. Одним із важливих факторів, що впливають на якість електроенергії, є нерівномірність навантаження в електричних мережах. Це явище проявляється як у вигляді асиметрії струмів і напруг у трифазних системах, так і через нестабільність рівнів навантаження в часі, що призводить до низки негативних наслідків для роботи електрообладнання і самої енергосистеми.

Нерівномірність навантаження виникає внаслідок нерівномірного підключення споживачів до фаз мережі або внаслідок змінних характеристик самих споживачів. Зокрема, у системах із значною кількістю однофазних споживачів, характерних для побутового сектору або дрібних комерційних підприємств, навантаження на різні фази часто істотно відрізняється. У промислових об'єктах нерівномірність навантаження може виникати через різний графік роботи обладнання, запуск потужних електродвигунів або роботу технологічних агрегатів у змінних режимах.

Одним із основних наслідків нерівномірного навантаження є виникнення асиметрії напруг у трифазних системах. Асиметрія, у свою чергу, призводить до появи в системі струму нульової послідовності та додаткових втрат енергії в мережі. При значній асиметрії напруг електричні двигуни працюють у неномінальному режимі, що викликає перегрів, зниження ефективності, втрату крутного моменту і передчасний вихід з ладу обладнання. Особливо вразливими є електронні системи, джерела безперебійного живлення та комп'ютерна техніка, для яких симетрія фаз має критичне значення.

Крім асиметрії, нестабільність навантаження у часі може викликати коливання напруги, короткочасні провали або перенапруги, що негативно впливають на чутливе обладнання. Наприклад, у разі раптового підключення або відключення великих споживачів спостерігаються стрибки напруги, які можуть спричинити збої в роботі автоматизованих виробничих ліній, аварійні відключення або навіть фізичне пошкодження техніки.

Особливу увагу варто приділити впливу нерівномірності навантаження на ефективність використання енергетичних ресурсів. Асиметрія фаз та нестабільність навантаження спричиняють збільшення активних і реактивних втрат у лініях електропередачі, трансформаторах та розподільчих пристроях. Це, у свою чергу, веде до підвищення витрат на електроенергію як для енергопостачальних організацій, так і для кінцевих споживачів.

Для мінімізації впливу нерівномірності навантаження на якість електроенергії застосовуються різноманітні технічні та організаційні заходи. До основних технічних рішень належить оптимізація схем розподілу навантаження між фазами, застосування автоматичних балансувальних пристроїв, встановлення компенсуючих пристроїв для зниження асиметрії та впровадження стабілізаторів напруги. На підприємствах із великою кількістю потужних споживачів застосовуються системи активного керування навантаженням, які дозволяють рівномірно розподіляти споживання енергії протягом доби та уникати пікових навантажень.

Не менш важливим є впровадження систем постійного моніторингу параметрів якості електроенергії. Використання сучасних аналізаторів дозволяє в реальному часі фіксувати рівень асиметрії, виявляти випадки порушення балансу навантаження та оперативно вживати заходів для виправлення ситуації. Систематичний аналіз отриманих даних дає змогу розробляти програми профілактики нерівномірності навантаження та підвищення енергоефективності об'єкта.

Таким чином, вплив нерівномірності навантаження на якість електроенергії є багатогранною проблемою, яка зачіпає як технічні, так і економічні аспекти функціонування електроенергетичних систем. Усвідомлення важливості цього чинника та впровадження комплексних заходів для його мінімізації дозволяє суттєво покращити стабільність і надійність електропостачання, підвищити енергоефективність підприємств та забезпечити довгострокову безаварійну роботу обладнання.

Перелік посилань

1. IEEE Standards Association. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014).* IEEE, 2014. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
2. A. Domijan *et al*., "Power quality monitoring and analysis in a customized power industrial area using the FRIENDS concept," *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.00EX441)*, Orlando, FL, USA, 2000, pp. 379-384 vol.2, doi: 10.1109/ICHQP.2000.897710.

УДК 621.3

Олександр Ткаленко, аспірант
Дмитро Ципленков, к.т.н., доцент, завідувач кафедри електротехніки
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ

Системи опалення на базі теплових насосів мають значний потенціал у зменшенні споживання енергії, зниженні викидів парникових газів та використанні відновлюваних джерел енергії. Це робить їх одними з найбільш екологічно чистих рішень у сфері обігріву та охолодження будівель.

Існуючі проблеми.

Зменшення споживання енергії. Теплові насоси є дуже енергоефективними пристроями, оскільки здатні забезпечити велику кількість тепла на одиницю витраченої електричної енергії. Наприклад, для кожного кіловата електричної енергії, витраченого на роботу теплового насоса, можна отримати від 3 до 5 кВт тепла. Це значно знижує загальне споживання енергії в будівлі в порівнянні з традиційними системами опалення, такими як газові котли або електричні обігрівачі.

Результати досліджень.

1. Переваги з енергозбереження:

– зниження витрат на енергоресурси: через високу ефективність теплові насоси дозволяють значно скоротити витрати на енергію для опалення та охолодження;
– зменшення навантаження на енергетичні мережі: завдяки високому коефіцієнту перетворення енергії теплові насоси зменшують споживання енергії в загальному обсязі, що знижує навантаження на мережі;
– стабільність роботи в різних умовах: навіть за низьких температур (особливо у геотермальних системах) теплові насоси забезпечують стабільне постачання тепла, не знижуючи ефективність.

2. Викиди парникових газів

Оскільки теплові насоси використовують відновлювані джерела тепла, такі як повітря, земля чи вода, вони значно зменшують викиди парникових газів порівняно з традиційними методами опалення, які базуються на спалюванні викопних видів палива (газу, вугілля або нафти).

3. Вплив на викиди парникових газів:

– зниження викидів CO_2: теплові насоси працюють без безпосереднього спалювання палива, що призводить до зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу;
– ефективність при використанні відновлювальної електроенергії: у випадку, якщо електричні теплові насоси живляться від сонячних або вітрових електростанцій, зменшуються не тільки викиди CO_2 від спалювання палива, а й загальне екологічне навантаження;
– зниження викидів інших парникових газів (метан, оксиди азоту): технології, що використовують теплові насоси, не продукують метану чи оксидів азоту, які зазвичай викидаються при спалюванні природного газу та інших видів палива.

4. Загальний ефект:

Протягом експлуатації теплові насоси можуть зменшити викиди CO_2 на десятки відсотків у порівнянні з традиційними газовими або електричними опалювальними системами.

5. Використання відновлюваних джерел енергії

Однією з основних переваг теплових насосів є їх здатність працювати на відновлюваних джерелах енергії, що робить їх важливою частиною стратегії переходу до більш сталого та екологічного використання енергоресурсів.

6. Використання відновлювальних джерел енергії:

– енергія землі (геотермальні насоси): геотермальні теплові насоси використовують тепло, яке накопичується в землі, яка є стабільним джерелом тепла протягом усього року;

– енергія води (водні теплові насоси): тепло, що міститься в підземних водах, річках або озерах, є ще одним екологічно чистим джерелом енергії для теплових насосів;

– енергія повітря (повітряні теплові насоси): повітря, як джерело тепла, є доступним у будь-який час року, що робить повітряні теплові насоси зручними для використання в умовах помірного клімату.

7. Переваги використання відновлювальних джерел енергії:

– зниження залежності від викопних видів палива: теплові насоси, що використовують відновлювальні джерела, значно зменшують потребу в природному газі, вугіллі та нафті;

– відновлювані ресурси: джерела, такі як земля, вода та повітря, є невичерпними в межах людського використання, що дозволяє забезпечити стале постачання енергії для опалення в довгостроковій перспективі;

– стимулювання розвитку «чистих» енергетичних технологій: поєднання теплових насосів з іншими відновлювальними джерелами енергії, такими як сонячні панелі чи вітрові турбіни, може сприяти створенню інтегрованих, низьковуглецевих енергетичних систем.

8. Загальний екологічний ефект:

– використання теплових насосів як частини стратегії енергозбереження та зниження викидів парникових газів є ключовим елементом для досягнення цілей щодо скорочення негативного впливу на довкілля та забезпечення стійкого розвитку. Ці технології сприяють переходу до більш чистих і ефективних енергетичних систем, які допомагають зменшити глобальне потепління та негативний вплив на екосистеми;

– теплові насоси є важливим інструментом у забезпеченні енергозбереження та зниженні екологічного навантаження, оскільки вони ефективно використовують відновлювальні джерела енергії та зменшують викиди парникових газів.

9. Термін окупності

Термін окупності – це час, необхідний для того, щоб зекономлені витрати на енергію покрили початкові інвестиції. Цей період залежить від декількох факторів, таких як вартість початкових інвестицій, витрати на експлуатацію, поточні ціни на енергоносії та ефективність роботи теплового насоса.

Основні чинники, що впливають на термін окупності:

– ціна енергії: чим вищі витрати на традиційні енергоносії (газ, електрика), тим швидше окупається система теплового насоса;

– енергоефективність: чим ефективніше працює система (чим вищий COP – коефіцієнт ефективності), тим менше енергії потрібно для опалення;

– місцеві умови: для геотермальних і водних насосів термін окупності може бути меншим через стабільніші умови експлуатації.

Приклад окупності:

– для повітряних теплових насосів термін окупності може становити від 5 до 10 років;

– для геотермальних систем цей термін може бути від 7 до 15 років в залежності від глибини свердловин і місцевих умов.

10. Державні субсидії та підтримка

Державна підтримка є важливим фактором для зниження початкових витрат і пришвидшення терміну окупності для власників будинків і підприємств, що вирішують впровадити теплові насоси. Багато країн пропонують програми субсидій, пільгових кредитів або податкових знижок для стимулювання використання відновлювальних джерел енергії та енергоефективних технологій.

Типи державної підтримки:

– субсидії на купівлю та установку теплових насосів. Вони можуть покривати частину вартості обладнання та робіт;
– податкові пільги та знижки, які дозволяють зменшити податкові зобов'язання при покупці енергоефективного обладнання;
– фінансування та пільгові кредити для установки систем опалення на базі теплових насосів;
– програми, що стимулюють використання відновлювальних джерел енергії (наприклад, за допомогою компенсації частини вартості для геотермальних або водяних насосів).

Приклад:

У деяких європейських країнах (наприклад, Німеччина, Франція) можна отримати до 30% знижки на вартість обладнання і робіт за рахунок державних програм.

В Україні також існують програми, які передбачають надання державної підтримки для інсталяції теплових насосів у рамках енергетичних проектів, що сприяють енергоефективності.

Висновки.

Економічний аналіз впровадження теплових насосів свідчить про значні переваги цієї технології. Хоча початкові інвестиції можуть бути високими, низькі операційні витрати та швидкий термін окупності роблять теплові насоси вигідним довгостроковим рішенням для зниження витрат на опалення. Державні субсидії та підтримка значно полегшують фінансовий бар'єр, стимулюючи використання енергоефективних технологій.

УДК 621.316.925

Ровенський О.О.
E-mail:rovenskyioleg7@gmail.com; https://orcid.org/0000-0002-0628-5188
Інженерний навчально-науковий інститут Запорізького національного університету, (Україна)

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

У сучасних умовах розвитку енергетики все більшого значення набувають розподілені електроенергетичні системи, у яких генерація і споживання енергії розташовані територіально близько одне до одного. Така структура передбачає не лише наявність великої кількості незалежних джерел енергії, зокрема відновлюваних, але й підвищену відповідальність кінцевих споживачів за підтримання параметрів якості електроенергії. Це створює нові виклики в управлінні якістю енергопостачання, оскільки розподілені системи відрізняються високою динамікою режимів, варіативністю конфігурацій, нестабільністю джерел живлення та непередбачуваними коливаннями навантажень.

На відміну від централізованих енергетичних мереж, де за якість енергії відповідальні великі оператори, у розподілених системах завдання забезпечення стабільної напруги, чистоти частоти, симетрії фаз та низького рівня гармонічних спотворень лягає також на споживачів, генераторів і операторів мікромереж. Це вимагає не лише моніторингу, але й активного регулювання параметрів електроенергії на кожній ділянці мережі.

Одним з основних інструментів такого управління є застосування інтелектуальних систем, які включають високочастотні сенсори, аналізатори якості, пристрої з адаптивним керуванням, автоматизовані контролери та програмні комплекси SCADA. Ці системи дозволяють здійснювати оперативне втручання у випадку виявлення порушень, а також автоматично адаптувати параметри роботи обладнання до умов зовнішнього середовища.

Прикладом ефективної технології є системи DVR (Dynamic Voltage Restorer) - пристрої для динамічної стабілізації напруги. Вони підключаються в середині розподільної мережі паралельно до навантаження і при виявленні провалу або перенапруги миттєво додають або віднімають напругу необхідної амплітуди і фази, забезпечуючи стабільність параметрів живлення для критичних споживачів. DVR широко застосовуються на об'єктах високоточного виробництва, у дата-центрах, фармацевтичній та електронній промисловості, де навіть короткочасне відхилення напруги може призвести до серйозних збоїв.

Ще одним прикладом є системи накопичення енергії - ESS (Energy Storage Systems), які відіграють роль буфера між джерелом і споживачем. Вони забезпечують миттєву компенсацію дефіциту потужності, стабілізують коливання напруги й частоти, а також згладжують нерівномірність споживання. У розподілених мережах ESS можуть також використовуватися для покриття пікового навантаження, компенсації реактивної потужності та підтримки автономного режиму роботи у випадку втрати зовнішнього живлення. Поєднання ESS із системами відновлюваної генерації значно підвищує енергоефективність і надійність локального енергозабезпечення.

Технологія VVC (Volt-Var Control) - це інтелектуальна система автоматизованого керування напругою та реактивною потужністю, яка відіграє важливу роль у забезпеченні якості електроенергії в сучасних розподілених електричних мережах. Вона ґрунтується на динамічному балансуванні профілю напруги в мережі та оптимізації режимів споживання і генерації реактивної потужності для досягнення енергоефективності, мінімізації втрат, покращення стабільності та підтримання нормативних показників якості електропостачання.

Основна функція VVC полягає в тому, щоб у режимі реального часу реагувати на зміну параметрів напруги та навантаження, автоматично регулюючи роботу таких елементів, як обмотки регулювання трансформаторів, конденсаторні батареї, індуктивності, інвертори джерел відновлюваної енергії та пристрої розподілу навантаження. Завдяки цьому VVC забезпечує динамічну компенсацію реактивної потужності, зменшення коливань напруги,

запобігання перенапругам або провалам, а також підвищення коефіцієнта потужності в усій мережі.

Застосування VVC особливо ефективне в умовах роботи з великою кількістю джерел із нестабільною генерацією, таких як сонячні та вітрові електростанції, де зміни потужності відбуваються швидко і нерівномірно. У таких випадках VVC не лише згладжує параметри, але й виконує роль адаптивного буфера між виробником енергії та споживачем. В умовах високої динаміки навантаження (наприклад, у мікромережах промислових підприємств або міських кварталів) VVC дозволяє централізовано або локально координувати дії всіх пристроїв регулювання, забезпечуючи таким чином узгодженість їх роботи.

Система VVC зазвичай є компонентом ширших платформ керування розподіленими мережами, таких як системи автоматизації розподілу (DMS – Distribution Management Systems), енергетичні платформи Smart Grid, цифрові підстанції. Її перевага полягає в можливості інтеграції з технологіями IoT, машинного навчання, прогнозної аналітики та цифрових близнюків, що дозволяє ще ефективніше адаптувати режими до мінливих умов.

Таким чином, Volt-Var Control – це не просто допоміжна функція, а стратегічний елемент нової енергетичної архітектури, що забезпечує гнучкість, якість та стабільність у динамічному середовищі розподіленої генерації. Вона дозволяє розширити функціональність існуючих мереж без потреби в дорогих модернізаціях, підтримує енергоефективність і дає можливість інтегрувати нові типи генераторів і навантажень із мінімальним впливом на загальний профіль якості електроенергії.

Інтеграція всіх вищезгаданих технологій - DVR, ESS, VVC - в єдину систему управління якістю електроенергії дозволяє створити адаптивне середовище, яке гнучко реагує на зміну умов споживання і генерації. Це середовище здатне не лише підтримувати якість енергії в заданих межах, але й забезпечувати енергоефективність, економічність і стійкість розподілених систем до зовнішніх збурень. Таким чином, управління якістю електроенергії в умовах децентралізації є не лише технічним завданням, а ключовим компонентом стратегії стабільного розвитку сучасної енергетики.

Перелік посилань

1. IEC 61000-4-30:2015. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods*. 3rd edition. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.
2. Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). *Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review*. Energies, *13*(21), 5792. https://doi.org/10.3390/en13215792
3. Marini, A., Ghazizadeh, M. S., Mortazavi, S. S., & Piegari, L. (2019). *A harmonic power market framework for compensation management of DER based active power filters in microgrids. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 113*, 916–931. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.017
4. Z. Chen, Z. Du and H. Zhan, "An optimal volt/var control strategy for an islanded microgrid considering the volt/var control capability," *8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019)*, Shanghai, China, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2019.0487.
5. R. Moghe, D. Tholomier, D. Divan, J. Schatz and D. Lewis, "Grid Edge Control: A new approach for volt-var optimization," *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, Dallas, TX, USA, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/TDC.2016.7519895.

УДК 621.316.92

Верьовкін Олександр - начальник електроремонтної служби металообробного виробництва, ПАТ "Дніпроважмаш", Дніпро, Україна
e-mail: alex1monya@gmail.com; https://orcid.org/0009-0004-4253-9802

АНАЛІЗ КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

Короткочасні перерви електропостачання є одним із найпоширеніших і найнебезпечніших типів порушень якості електроенергії на промислових об'єктах. Незважаючи на їхню короткочасність – від кількох мілісекунд до декількох секунд – такі події можуть завдати значної шкоди виробничим процесам, призводити до перебоїв у роботі обладнання, втрат продукції та фінансових збитків. У сучасних умовах автоматизації виробництва і зростання залежності від чутливого електронного обладнання значення стабільності електропостачання стає критично важливим для підтримання конкурентоспроможності підприємств.

Основними причинами короткочасних перерв електропостачання є короткі замикання в мережах, спрацьовування захисту від перенавантаження або коротких замикань, переключення на резервні джерела живлення, аварії на трансформаторних підстанціях, вплив погодних явищ, таких як буревії, грози або обмерзання ліній електропередач. Також значну роль відіграють внутрішні чинники: дефекти в розподільчих пристроях, старіння електрообладнання, неправильне налаштування захисних пристроїв і перевантаження внутрішніх мереж.

Аналіз причин перерв показує, що велика їхня частка виникає саме через спрацьовування захисту на стороні електропостачальника. У разі короткого замикання навіть на віддаленій ділянці лінії електропередач механізм селективного вимкнення може вимагати короткочасного відключення напруги для ізоляції дефектної ділянки. Після автоматичного повторного вмикання електропостачання відновлюється, але технологічний процес на підприємстві вже може бути порушено.

Наслідки короткочасних перерв електропостачання залежать від характеру виробничого процесу та чутливості обладнання. У галузях із безперервним виробництвом, наприклад у металургії, харчовій промисловості або фармацевтичній індустрії, навіть секундне зникнення напруги може призвести до аварійної зупинки лінії, псування продукту, пошкодження проміжної продукції або потреби в повторному запуску складних виробничих процесів. У інформаційних технологіях короткочасні перерви можуть спричинити втрату даних, пошкодження програмного забезпечення та вихід з ладу серверного обладнання.

Особливу небезпеку короткочасні перерви становлять для систем автоматизації та керування, де стабільність живлення є запорукою коректного виконання алгоритмів управління технологічними процесами. Навіть дуже коротке припинення електроживлення призводить до перезавантаження контролерів, збоїв у роботі датчиків і виконавчих механізмів, що може вимагати тривалого часу для відновлення нормальної роботи.

У практиці промислових підприємств важливим є не лише факт фіксації перерв електропостачання, а й глибокий аналіз їхніх характеристик: тривалості, частоти, джерела виникнення та впливу на технологічні процеси. Для цього впроваджуються сучасні системи моніторингу якості електроенергії, які здатні з високою точністю фіксувати навіть мілісекундні події та накопичувати статистичні дані для подальшого аналізу.

Методи мінімізації впливу короткочасних перерв передбачають застосування джерел безперебійного живлення для захисту критичного обладнання, впровадження резервного живлення з автоматичним перемиканням, використання подвійного живлення для важливих об'єктів і побудову мереж із підвищеною стійкістю до аварій. Зокрема, системи UPS (Uninterruptible Power Supply) забезпечують негайне переключення на внутрішній

акумуляторний ресурс у разі зникнення напруги, що дозволяє уникнути збоїв у роботі комп'ютерної техніки, автоматики та телекомунікацій.

Автоматичні перемикачі на резерв (ATS) забезпечують переключення живлення з основного джерела на резервне за частки секунди, що є особливо важливим для підприємств із високими вимогами до безперервності технологічних процесів. В окремих випадках також використовуються дизель-генераторні установки, що автоматично запускаються у разі тривалого зникнення живлення.

Правильне проєктування систем електроживлення із забезпеченням необхідного рівня резервування, сегментації навантажень за критичністю, використання селективного захисту і віддаленого моніторингу дозволяє суттєво знизити ризики, пов'язані з короткочасними перервами. Важливим напрямком є регулярне тестування систем резервного живлення для перевірки їхньої готовності до аварійних ситуацій.

Економічний ефект від заходів щодо мінімізації впливу короткочасних перерв електропостачання полягає у скороченні часу простоїв, зниженні кількості втраченої продукції, уникненні витрат на відновлення виробничого циклу та зменшенні ризиків пошкодження дорогого технологічного обладнання. Крім того, підтримка стабільності електропостачання сприяє підвищенню репутації підприємства як надійного партнера серед споживачів та клієнтів.

Таким чином, короткочасні перерви електропостачання є критичним фактором, що вимагає постійної уваги та комплексного підходу до аналізу, моніторингу і мінімізації їхнього впливу на виробничі процеси. Своєчасне впровадження сучасних технологічних рішень, правильне проєктування систем енергопостачання та грамотна експлуатація обладнання дозволяють істотно підвищити стійкість промислових підприємств до енергетичних ризиків та забезпечити безперервність їхнього функціонування в умовах зростаючих вимог до якості електроенергії.

Перелік посилань

4. IEEE Standards Association. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014).* IEEE, 2014. Available at: https://standards.ieee.org/ieee/519/3710
5. H. Zaitsu *et al.*, "Uninterruptible Power Supply System Utilizing Electric Double-Layer Capacitors," *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, Nagoya, Japan, 2007, pp. 230-235, doi: 10.1109/PCCON.2007.372972.
6. R. Villafafila, A. Sumper, D. Montesinos-Miracle, A. Sudria-Andreu, E. Jaureguialzo and D. Jerez, "Selection criteria of high-power static Uninterruptible Power Supplies," *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/EPQU.2007.4424196.

УДК 621.313.333

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
А. Карнаух, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Абузяров, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЬОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОЇ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Нерегульовані асинхронні електроприводи є основою для більшості промислових процесів, оскільки забезпечують ефективне та надійне керування електромеханічними системами. Вони застосовуються у транспортних системах, металургійній промисловості, деревообробній сфері, системах водопостачання та вентиляції, харчовій промисловості та в інших критично важливих галузях. Проте стабільність і продуктивність таких систем значною мірою залежать від якості електропостачання, яке може змінюватися під впливом різних факторів, таких як перевантаження в електромережах, робота великої кількості нелінійних навантажень, коливання параметрів електроенергії, електромагнітні завади тощо [1].

Одним із найбільш серйозних викликів для роботи нерегульованих асинхронних електроприводів є варіації напруги. В умовах її нестабільності двигуни можуть втрачати номінальну потужність, працювати в режимі підвищеного навантаження, що призводить до перегріву обмоток та механічного зношування. Відхилення напруги від номінального рівня на ±10% здатне знизити ефективність двигуна на 15-20%, що значно впливає на роботу виробничих систем. Наприклад, у насосних системах таке зниження може спричинити недостатнє подання води, що критично для виробничих та побутових процесів. Вентиляторні установки за таких умов можуть працювати з нерівномірною швидкістю, що знижує продуктивність системи та спричиняє додаткові вібраційні навантаження.

Окремо слід виділити проблему фазової асиметрії, яка є наслідком нерівномірного навантаження на трифазні мережі. При наявності суттєвої асиметрії напруги понад 2-3% відбувається значний розбаланс магнітного поля, що призводить до появи паразитних струмів у двигуні, підвищеного перегріву ротора та зниження обертального моменту. Це не тільки знижує загальну продуктивність електропривода, але й може викликати прискорене зношування підшипників та інших механічних компонентів. У промислових масштабах така проблема може мати катастрофічні наслідки, зокрема у високоточних виробничих процесах, де стабільність електроживлення є критично важливою [2,3].

Гармонічні спотворення – ще один важливий чинник, що впливає на роботу асинхронних електроприводів. Вони виникають через наявність великої кількості нелінійних споживачів у системі, зокрема частотних регуляторів, інверторів, імпульсних перетворювачів та іншого електронного обладнання. Наявність гармонік у мережі призводить до появи додаткових втрат у двигуні, що може скоротити його ресурс на 30-40%. Підвищене нагрівання обмоток через дію гармонійних складових струму спричиняє деградацію ізоляції та зростання ризику міжвиткових замикань. Крім того, гармоніки можуть впливати на точність керування технологічними процесами, оскільки їхня присутність спричиняє нестабільність обертів двигуна, особливо в умовах змінного навантаження.

Вплив імпульсних перенапруг на асинхронні двигуни також є суттєвою проблемою, особливо в умовах частих комутаційних процесів у мережі. Імпульсні стрибки напруги можуть виникати під час вмикання або вимикання потужного обладнання, а також через комутацію трансформаторів і ліній електропередач. Такі явища призводять до пробою ізоляції,

передчасного виходу з ладу електродвигунів і потребують застосування додаткових захисних пристроїв, таких як фільтри, стабілізатори напруги та захисні реле.

Для забезпечення надійної роботи нерегульованих асинхронних електроприводів необхідно застосовувати заходи компенсації нестабільності параметрів електроживлення. Одним із найбільш ефективних методів є використання стабілізаторів напруги, що підтримують оптимальні параметри електропостачання в межах допустимих значень. Крім того, застосування конденсаторних батарей дозволяє знизити рівень реактивної потужності, що покращує коефіцієнт потужності та зменшує навантаження на генератори й трансформатори [4].

Окремої уваги заслуговує використання активних фільтрів потужності, які здатні компенсувати гармонічні спотворення та коригувати параметри мережі в режимі реального часу. Автоматизовані системи моніторингу якості електроенергії дозволяють здійснювати постійний контроль параметрів електроживлення та забезпечувати своєчасне виявлення відхилень. Використання таких технологій дозволяє знизити втрати електроенергії на 10-15% та суттєво підвищити експлуатаційну надійність обладнання.

Важливим напрямом подальшого розвитку є впровадження адаптивних алгоритмів управління електроприводами, які можуть коригувати параметри роботи двигуна відповідно до реальних умов електропостачання. Використання алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту дозволить значно покращити ефективність роботи електроприводних систем, особливо в умовах промислових підприємств з великим навантаженням на електромережу. Такі системи можуть автоматично підлаштовувати обертовий момент, швидкість обертання ротора та інші параметри для забезпечення максимальної енергоефективності.

Таким чином, аналіз експлуатаційних характеристик нерегульованих асинхронних електроприводів в умовах нестабільної якості електропостачання є важливим завданням для підвищення ефективності роботи промислових підприємств. Запровадження новітніх технологій моніторингу, використання методів компенсації нестабільності параметрів електромережі, адаптивне управління та цифрові системи аналізу якості електроенергії дозволяють значно покращити стабільність та продуктивність електроприводів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів керування, розробку більш ефективних фільтруючих систем та інтеграцію відновлюваних джерел енергії для покращення енергетичної стабільності. Використання сучасних підходів у цій галузі дозволить не лише оптимізувати витрати електроенергії, але й забезпечити стійку роботу електроприводних механізмів у складних виробничих умовах.

Перелік посилань

1. Kuznetsov, V., Nikolenko, A. (2015). Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity, EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. VOL 1, NO 8(73) (2015): ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT. Pages: 37 - 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755.

2. Kuznetsov Vitaliy, Tryputen Nikolay, Kuznetsova Yevheniia "Evaluating the Effect of Electric Power Quality upon the Efficiency of Electric Power Consumption," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 556-561, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879841.

3. Kachan Yu., Nikolenko A.V., Kuznetsov V.V. Thermal component of economic damage from asynchronous motor operations under conditions of low-quality electric power. Mining electromechanics and automation: Scientific and technical collection. Volume 85. Pp. Pages 113-118. 2010.

4. Tryputen, M., Kuznetsov, V., Kuznetsova, A., Tryputen, M., Kuznetsova, Y., Serdiuk, T. Improving the Reliability of Simulating the Operation of an Induction Motor in Solving the Technical and Economic Problem (2021) Advances in Intelligent Systems and Computing, 1247 AISC, pp. 143-152. DOI: 10.1007/978-3-030-55506-1_13

УДК 621.315.2

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
С. Тимченко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Гридасов, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ СТРУМОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

Надійність та ефективність експлуатації кабельних ліній електричних мереж відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного електропостачання споживачів. В умовах зростання навантажень, спричинених підключенням нових потужностей та зміною характеру електроспоживання, питання підвищення стійкості кабельних ліній до струмових перевантажень набуває особливої актуальності. Перевантаження можуть спричиняти перегрів кабелів, деградацію ізоляції та передчасний вихід з ладу мережевої інфраструктури. Впровадження сучасних методів моніторингу стану кабельних ліній, використання матеріалів з покращеними термічними характеристиками та застосування адаптивних систем керування навантаженням дозволяють підвищити довговічність та надійність електричних мереж. У даній роботі розглядаються ключові фактори, що впливають на стійкість кабельних ліній до перевантажень, та методи їхньої оптимізації [1,2].

Струмові перевантаження в кабельних мережах виникають у результаті надмірного збільшення споживаної потужності, неправильного розрахунку навантаження або аварійних ситуацій у мережі. Основним наслідком є підвищення температури кабелів, що призводить до старіння та деградації матеріалів ізоляції, збільшення втрат електроенергії, підвищеного ризику коротких замикань та аварійних відключень. Зменшення впливу перевантажень можливе завдяки використанню термостійких матеріалів, ефективному розподілу навантаження та впровадженню систем моніторингу. Застосування датчиків температурного контролю забезпечує раннє виявлення зон перегріву, що дозволяє своєчасно здійснювати коригуючі заходи.

Сучасні кабельні системи, виготовлені із зшитого поліетилену (XLPE), мають покращені термічні характеристики, що дозволяє експлуатувати їх при підвищених температурах без суттєвого зниження терміну служби. Автоматизовані системи керування навантаженням сприяють рівномірному розподілу електроенергії між різними ділянками мережі, зменшуючи локальні перевантаження. Оптимізація режимів експлуатації здійснюється за допомогою математичного моделювання, що дозволяє прогнозувати можливі сценарії розвитку перевантажень та запобігати їх негативним наслідкам [3].

Ефективне розсіювання тепла є важливим елементом захисту кабельних ліній від перегріву. Використання терморозсіювальних оболонок, спеціальних кабельних лотків, природного та примусового охолодження дає змогу значно покращити тепловий баланс. Застосування сучасних термоізоляційних матеріалів дозволяє знизити ризик перегріву та продовжити термін експлуатації кабелів. Інтеграція методів штучного інтелекту у прогнозування навантажень підвищує точність аналізу та дає змогу розробляти ефективні стратегії зменшення перевантажень [4].

Аналітичні дослідження підтверджують, що впровадження комплексних рішень із моніторингу та керування навантаженням дозволяє знизити аварійність кабельних ліній на 30-40%, а використання нових матеріалів подовжує термін служби кабелів на 20-25%. Дослідження світових стандартів експлуатації показують, що модернізація кабельних ліній із впровадженням інтелектуальних систем керування зменшує ризики аварійних ситуацій на

50% та сприяє зниженню експлуатаційних витрат. Застосування інноваційних технологій у будівництві та експлуатації кабельних ліній дозволяє збільшити їхню енергоефективність на 15%, що має значний економічний ефект на великих енергетичних об'єктах [5].

Підвищення ефективності експлуатації кабельних ліній електричних мереж в умовах струмових перевантажень є важливим завданням для енергетичної інфраструктури. Використання сучасних технологій моніторингу, новітніх матеріалів та інтелектуальних систем керування навантаженням дозволяє мінімізувати негативний вплив перевантажень, продовжити термін експлуатації кабелів та підвищити загальну ефективність електромереж. Аналітичні дослідження підтверджують, що впровадження інноваційних рішень у кабельній інфраструктурі забезпечує довгострокове зниження витрат на ремонт та обслуговування мереж. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку нових методів термостійкості кабельних трас, удосконалення програмних рішень для прогнозування навантажень та впровадження автоматизованих систем керування з використанням технологій штучного інтелекту. Врахування цих аспектів сприятиме забезпеченню стабільності електропостачання та зниженню експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі.

Перелік посилань

1. Lukens, L.L., “Nuclear Power Plant Electrical Cable Damageability Experiments,” Sandia National Laboratories Report SAND82-0236, Albuquerque NM, 2006. pp. 245-256

2. Jacobus, M.J., and Fuehrer, G.F., “Submergence and High Temperature Steam Testing of Class 1E Electrical Cables,” Sandia National Laboratories Report SAND90-2629; NUREG/CR-5655, Albuquerque NM, 1991. pp. 32-47

3. Nowlen, S.P., “An Investigation of the Effects of Thermal Aging on the Fire Damageability of Electric Cables,” Sandia National Laboratories Report SAND90-0696; NUREG/CR-5546, Albuquerque NM, 1991. pp. 67-85

4. Babrauskas, V., (2004) Arc Beads from Fires: Can ‘Cause’ Beads Be Distinguished from ‘Victim’ Beads by Physical or Chemical Testing? J. Fire Protection Engineering 14:125-147, doi:10.1177/1042391504036450.

5. Mazer, W.M., Electrical Accident Investigation Handbook, 3 vols., Electrodata, Inc., Glen Echo MD, various dates). 2006. pp. 37-51

УДК 621.313.333

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Сергій Сіверський, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Євген Гурін, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Енергоефективність асинхронних електродвигунів є одним із ключових параметрів, що визначають економічність експлуатації електротехнічного обладнання. В умовах зростання вартості електроенергії та необхідності оптимального використання енергетичних ресурсів особливу увагу приділяють дослідженню впливу параметрів електроживлення на продуктивність та ефективність роботи електродвигунів. Зміни напруги, частоти та симетричності електроживлення можуть суттєво впливати на коефіцієнт корисної дії (ККД), енергоспоживання, стабільність роботи двигуна та його довговічність.

Сучасні методи підвищення енергоефективності асинхронних двигунів включають застосування частотних перетворювачів, систем контролю параметрів живлення, а також новітніх конструктивних та матеріальних рішень. Дослідження у цій сфері дозволяють визначити оптимальні режими роботи двигунів, що сприяють зменшенню втрат електроенергії та підвищенню надійності електроустановок.

Зміна параметрів електроживлення має значний вплив на роботу асинхронних електродвигунів. Наприклад, зниження напруги призводить до зменшення пускового моменту двигуна, що може негативно позначитися на його здатності розпочати рух під навантаженням. Водночас підвищення напруги може спричинити перенасичення магнітопроводу, що веде до зростання втрат у сталі, перегріву обмоток та зниження загальної ефективності двигуна.

Частотне регулювання електроживлення є одним із найефективніших методів підвищення енергоефективності двигунів. Використання частотних перетворювачів дозволяє змінювати швидкість обертання ротора відповідно до навантаження, що значно знижує втрати енергії та покращує динамічні характеристики двигуна. Крім того, це дає можливість забезпечити плавний пуск та зменшити пускові струми, що позитивно впливає на термін служби електродвигунів та їхню експлуатаційну надійність.

Несиметричність напруги є одним із факторів, що можуть негативно впливати на роботу двигунів. Асиметрія напруги викликає нерівномірний розподіл струму між фазами, що призводить до додаткових втрат у мідних обмотках та нагріву двигуна. Це може скоротити термін його служби, збільшити експлуатаційні витрати та спричинити аварійні ситуації в електромережі. Моніторинг параметрів електроживлення та корекція напруги за допомогою стабілізаторів або компенсаційних пристроїв є ефективними заходами для запобігання таким проблемам.

Окрему увагу слід приділити впливу гармонійних спотворень у системі електроживлення на енергоефективність двигунів. Високий рівень гармонік у напрузі може спричиняти збільшення втрат енергії, перегрів обмоток і погіршення електромагнітної сумісності з іншими елементами електроустановки. Для мінімізації впливу гармонійних спотворень використовуються фільтри гармонік та активні коректори живлення.

Для оцінки впливу змін параметрів електроживлення на енергоефективність асинхронних двигунів було проведено серію експериментальних досліджень. Двигуни тестувалися в різних режимах: при номінальній напрузі, при зниженій та підвищеній напрузі,

а також при різних частотах живлення. Оцінювалися параметри електроспоживання, нагрівання обмоток, стабільність обертів ротора та загальний рівень втрат електроенергії.

Результати досліджень показали, що оптимальне регулювання частоти та напруги живлення може забезпечити зменшення енергоспоживання на 10-20% у порівнянні з роботою двигуна без систем регулювання. Крім того, використання частотних перетворювачів дозволяє покращити динамічні характеристики двигуна, що особливо важливо для обладнання зі змінними навантаженнями.

Дослідження підтвердили, що енергоефективність асинхронних електродвигунів суттєво залежить від параметрів електроживлення. Оптимізація напруги, частоти та корекція симетричності живлення сприяє зниженню втрат електроенергії, підвищенню ККД та збільшенню терміну експлуатації двигунів. Використання частотних перетворювачів є найбільш ефективним способом керування енергоспоживанням електродвигунів та мінімізації втрат у мережі.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку інтелектуальних систем управління електроживленням, що базуються на аналізі робочих параметрів двигуна в реальному часі. Інтеграція таких систем з цифровими технологіями та алгоритмами штучного інтелекту дозволить забезпечити ще вищий рівень енергоефективності та стабільності роботи асинхронних електродвигунів у промислових та побутових електромережах.

Перелік посилань

1. С. А. Бурьян, Л. Н. Наумчук, Н. В. Печеник, RESEARCH OF ENERGY LOSSES IN CONVEYOR ELECTROMECHANICAL SYSTEMS WITH TRACTION BODY SPEED CONTROL , Electrotechnic and Computer Systems: No 15(91) (2014): Electrotechnic and Computer Systems

2. S. Rachev, D. Stefanov, L. Dimitrov and D. Koeva, "Evaluation of Electric Power Losses of an Induction Motor Driving a Compact Electric Vehicle at Change of Parameters and Loads," *2019 Electric Vehicles International Conference (EV)*, Bucharest, Romania, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/EV.2019.8893057.

3. S. Rachev and L. Dimitrov, "Study on electric vehicle induction motor drive", *Proceedings of 13th International Conference 'Research and Development in Mechanical Industry' RaDMI 2013*, vol. 2, pp. 920-926, 2013, ISBN 978-86-6075-043-5.

УДК 537.84

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Р. Діденко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Абузяров, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛІВ РІЗНОГО РОДУ НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ТЕПЛООБМІНУ В ПІЧНОМУ ПРОСТОРІ

Інтенсифікація теплообміну в промислових печах є важливим напрямом сучасної теплотехніки, оскільки вона дозволяє зменшити енергетичні витрати, покращити ефективність роботи обладнання та підвищити якість кінцевого продукту. У промислових процесах, пов'язаних із високотемпературною обробкою матеріалів, рівномірність розподілу температури та ефективність теплопередачі мають вирішальне значення для досягнення високої продуктивності та економічної ефективності. Одним із перспективних підходів до інтенсифікації теплообміну є використання електромагнітних та механічних полів, які можуть впливати на процеси конвекції, теплопровідності та випромінювання у пічному просторі.

Одним із найбільш ефективних методів інтенсифікації теплообміну є застосування електромагнітних полів. У металургійних та інших термічних процесах магнітні та електричні поля використовуються для створення контрольованих потоків теплоносія або розплаву, що сприяє рівномірному розподілу температури та підвищенню швидкості теплопередачі [1].

Електромагнітне поле впливає на рух заряджених частинок і струмопровідних рідин, що дозволяє створювати додаткові сили, які забезпечують ефективне перемішування розплавленого металу або інших теплоносіїв. Це особливо важливо для металургійних процесів, де рівномірність температурного поля у розплаві визначає якість кінцевого продукту. Вплив змінного магнітного поля може використовуватися для покращення теплообміну за рахунок створення електромагнітного перемішування, що зменшує локальні перегріви та запобігає утворенню зон застою.

Дослідження показують, що використання електромагнітного впливу дозволяє підвищити теплопередачу в промислових печах до 30%, знижуючи при цьому енергетичні витрати. Крім того, застосування магнітного поля дозволяє більш рівномірно розподіляти температурне навантаження, що зменшує ризики утворення локальних дефектів у металі та інших матеріалах.

Окрім електромагнітного впливу, значну роль у підвищенні ефективності теплообміну відіграють механічні методи, такі як вібраційний вплив, імпульсні навантаження та турбулізація потоків теплоносія.

Вібраційний вплив дозволяє покращити конвекцію та теплопередачу в газовому середовищі печей. Створення механічних коливань у пічному просторі сприяє руйнуванню ламінарного пограничного шару на поверхні нагрітих матеріалів, що значно підвищує швидкість теплопередачі. Вібраційні методи особливо ефективні для газових печей, де необхідно збільшити рівномірність розподілу температури без значного збільшення енергетичних витрат [2].

Імпульсні навантаження можуть використовуватися для покращення теплообміну у середовищах із змінними потоками теплоносія. Періодичні зміни потужності нагрівальних елементів або тиску газового середовища створюють турбулентні потоки, які сприяють активнішому перемішуванню газів і рівномірному розподілу теплової енергії.

Також одним із ефективних методів є використання механічних пристроїв для направленого перемішування теплоносія. Наприклад, вентилятори та механічні змішувачі

можуть бути інтегровані у конструкцію печей для забезпечення кращої циркуляції повітря або газових сумішей. Це дозволяє збільшити швидкість теплообміну та забезпечити більш рівномірний розподіл температур у пічному просторі [3].

У сучасних промислових печах ефективність теплообміну значно підвищується завдяки використанню комбінованих методів, що поєднують електромагнітні та механічні впливи. Наприклад, у печах для плавлення металів може використовуватися поєднання магнітного перемішування та контрольованого потоку газового середовища, що дозволяє одночасно покращити гомогенізацію розплаву та забезпечити рівномірний розподіл тепла.

Такі методи дозволяють знизити енергетичні витрати та підвищити ефективність промислового обладнання. Використання комплексного підходу до управління теплообмінними процесами забезпечує більш раціональне використання енергоресурсів, що особливо важливо у сучасних умовах енергетичної нестабільності та необхідності зниження виробничих витрат.

Дослідження впливу різних полів на теплообмін у пічному просторі має велике значення для підвищення ефективності промислових процесів. Використання електромагнітних і механічних методів дозволяє значно покращити теплопередачу, знизити енергетичні витрати та підвищити якість кінцевої продукції.

Подальші дослідження у цій сфері повинні бути спрямовані на визначення оптимальних параметрів впливу, розробку нових матеріалів для нагрівальних елементів та вдосконалення конструкцій промислових печей. Це дозволить не тільки підвищити ефективність виробничих процесів, але й сприятиме зменшенню негативного впливу промислових технологій на навколишнє середовище.

Перелік посилань

1. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Щодо можливості підвищення енергоефективності нагрівальних печей за рахунок формування теплових потоків просторовими електричними полями. Металургія: наукові праці ЗДІА. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2013. Вип. 29. С. 121 – 125.

2. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Щодо можливості керування тепловими потоками просторовим електричним полем. Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. Днепропетровск: Новая идеология, 2013. Вып. 13. С. 80 - 84.

3. Качан Ю. Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Моделювання температурного режиму газової нагрівальної печі за наявності просторового електричного поля. Енергетика: економіка, технології, екологія. Київ: НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка», 2014. Вип. 2 (36). С. 30 - 34.

УДК 621.313.2

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Р. Єсін, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
І. Стрєлєнко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАШИН ТА АГРЕГАТІВ ГІДРОСТАНЦІЙ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

Гідроелектростанції великої потужності відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного та екологічно чистого електропостачання. Оптимізація роботи їхніх машин і агрегатів дозволяє значно підвищити енергетичну ефективність, зменшити експлуатаційні витрати та продовжити термін служби обладнання. Враховуючи сучасні технологічні можливості, вдосконалення систем регулювання, модернізація гідротурбін, генераторів та допоміжного обладнання дають змогу досягти більш високих показників ефективності роботи ГЕС.

Світовий досвід свідчить, що впровадження енергоефективних технологій у великих гідроагрегатах дозволяє зменшити втрати енергії на 10–15%, що забезпечує економію електроенергії в межах десятків гігават-годин на рік. Дослідження в цій сфері спрямовані на покращення режимів експлуатації, використання інтелектуальних систем керування та розробку нових конструкцій гідротурбін із покращеними аеродинамічними характеристиками [1].

Вдосконалення гідротурбін та їх компонентів є одним із найважливіших напрямів підвищення ефективності ГЕС. Застосування нових конструкцій робочих коліс, які мінімізують гідродинамічні втрати, дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії турбін. Використання композитних матеріалів та спеціальних покриттів знижує тертя та запобігає корозії, що подовжує експлуатаційний ресурс агрегатів.

Оновлення електричних генераторів та впровадження технологій змінного збудження дозволяє підвищити стабільність вихідних параметрів енергії. Модернізація систем керування потоками води, зокрема впровадження цифрових датчиків та алгоритмів оптимального регулювання, дозволяє адаптувати роботу станції до зміни навантажень та умов експлуатації. Такі заходи сприяють зменшенню механічних втрат і підвищенню надійності роботи обладнання [2].

Системи прогнозування та управління потужністю відіграють значну роль у підвищенні енергетичної ефективності. Використання технологій машинного навчання та цифрових двійників дозволяє аналізувати експлуатаційні параметри в реальному часі та прогнозувати зміни режимів роботи агрегатів. Це дозволяє мінімізувати ризики аварій та забезпечити максимально ефективне використання водних ресурсів.

Оптимізація систем охолодження та мастильних матеріалів також є важливим напрямком підвищення ефективності. Використання сучасних систем теплообміну та екологічно безпечних мастильних рідин дозволяє знизити втрати енергії та зменшити негативний вплив на довкілля. Інтеграція автоматизованих систем моніторингу температурних режимів дає змогу вчасно реагувати на зміну умов роботи агрегатів та забезпечувати їхню стабільну роботу [3].

За даними Міжнародного агентства з відновлюваної енергетики, модернізація гідроагрегатів на станціях великої потужності дозволяє підвищити загальну ефективність на 8–12%, що відповідає додатковому виробітку електроенергії без необхідності будівництва

нових потужностей. В умовах зростання попиту на відновлювану енергію такі заходи є стратегічно важливими для енергетичної безпеки країн.

Підвищення енергетичної ефективності машин та агрегатів гідроелектростанцій великої потужності є ключовим напрямом модернізації гідроенергетичного сектора. Оптимізація роботи турбін, впровадження новітніх систем керування, використання інтелектуальних алгоритмів прогнозування та оновлення генераторного обладнання дозволяють значно підвищити коефіцієнт корисної дії станцій, скоротити втрати енергії та забезпечити стабільну експлуатацію обладнання [4].

Подальші дослідження мають бути зосереджені на впровадженні автоматизованих систем контролю, розробці нових методів регулювання водного потоку та інтеграції технологій зберігання енергії для підвищення гнучкості гідроелектростанцій у загальній енергетичній системі. Урахування сучасних технологічних досягнень дозволить ефективніше використовувати водні ресурси та мінімізувати екологічний вплив гідроенергетики на довкілля.

Перелік посилань

1. M. Wei, L. Lu, H. Zhou, L. Shen, Q. Wang and B. Hu, "Optimization Scheduling and Adequacy Evaluation of Cascade Hydropower Stations Considering the Extreme Weather," *2023 8th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, Shanghai, China, 2023, pp. 809-814, doi: 10.1109/ICPRE59655.2023.10353562.

2. X. Xu, "Integral sliding mode excitation optimization control method for high power motor in hydraulic pumping station," *2024 5th International Conference on Artificial Intelligence and Electromechanical Automation (AIEA)*, Shenzhen, China, 2024, pp. 993-996, doi: 10.1109/AIEA62095.2024.10692479.

3. P. K. Steimer, "Enabled by high power electronics - Energy efficiency, renewables and smart grids," *The 2010 International Power Electronics Conference - ECCE ASIA* -, Sapporo, Japan, 2010, pp. 11-15, doi: 10.1109/IPEC.2010.5542328

4. S. -M. Diga, N. Diga, P. -M. Mircea, M. -S. Nicolae and I. Mircea, "Modern Aspects of Analysis of the Efficient Operation of the Centrifugal Pumps within the Hydropower Facilities with Pumped Storage," *2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108167.

УДК 621.313.333

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
А. Карнаух, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Абузяров, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ANALYSIS OF THE IMPACT OF LOW-QUALITY ELECTRICITY ON INDUSTRIAL ENERGY SYSTEMS AND ECONOMIC EFFICIENCY

In the context of increasing global energy consumption and the transition to sustainable energy sources, ensuring the reliability and quality of electricity supply has become a critical challenge. Electricity grids play a vital role in transmitting energy from generators to end consumers, and any disruption in energy supply can significantly impact economic and social stability. The issue becomes even more pressing in countries facing geopolitical conflicts, such as Ukraine, where energy infrastructure is frequently targeted, leading to power outages and operational disruptions in critical sectors like healthcare, transportation, and industrial production.

Ukraine's power grid has faced unprecedented challenges since 2014, especially after the full-scale invasion in 2022. Precision strikes on power plants, substations, and transmission lines have led to severe energy shortages, making rapid restoration efforts difficult due to security risks and access limitations. These challenges underscore the importance of developing energy-efficient strategies, enhancing grid resilience, and integrating distributed generation sources such as renewables to mitigate risks.

One of the major problems in modern power systems is maintaining the quality of electricity supply. Variability in voltage, harmonic distortions, phase asymmetry, and electromagnetic interference significantly affect the performance and lifespan of industrial electrical equipment. Low-quality electricity leads to inefficiencies in industrial processes, increased energy losses, and higher operational costs. Key challenges include voltage fluctuations that reduce motor efficiency and cause overheating, phase asymmetry that generates unbalanced loads and accelerates equipment wear, harmonic distortions caused by non-linear loads increasing power losses and reducing efficiency, and impulse overvoltages leading to insulation failures and premature breakdowns.

The financial impact of poor electricity quality on industrial enterprises is significant. Companies bear both direct costs, such as increased electricity bills, network maintenance, and repair costs, and indirect costs, such as production downtime, lost revenue, and premature equipment replacement. Studies indicate that poor electricity quality can reduce equipment lifespan by 30–40% and increase operational losses by 15–20%. Additionally, inefficient power use contributes to higher energy consumption, affecting overall business profitability.

To mitigate the adverse effects of low-quality electricity, several technical and regulatory measures can be implemented. Voltage stabilizers and active power filters can minimize fluctuations and harmonic distortions. Automated monitoring systems enable real-time energy quality assessment. Smart grid technologies optimize electricity distribution and reduce losses. The integration of renewable energy sources enhances grid flexibility and energy security.

Advancements in artificial intelligence, the Internet of Things, and big data analytics are transforming the energy sector. Smart meters and automated demand response systems enable dynamic electricity pricing, helping to balance supply and demand efficiently. The introduction of AI-driven predictive maintenance further improves grid resilience by identifying potential failures before they occur, reducing repair costs and preventing disruptions.

Electricity quality standards are critical for maintaining grid stability. In Ukraine, the Law on the Electricity Market and DSTU EN 50160:2014 define the key parameters that electricity must

meet. These regulations establish compensation mechanisms for consumers affected by poor electricity supply, enforce compliance measures for distribution operators, and set technical standards for voltage stability and electromagnetic compatibility.

Ensuring high-quality electricity supply requires a multidisciplinary approach combining technical innovation, economic optimization, and regulatory enforcement. Key areas of research include the development of more efficient energy storage solutions to balance grid fluctuations, advanced grid modeling and simulation to predict system vulnerabilities, AI-driven predictive maintenance systems for industrial applications, and increased cybersecurity measures to protect smart grids from cyberattacks.

The growing demand for high-quality and cost-effective electricity necessitates a comprehensive approach to energy system management. Addressing power quality issues through advanced monitoring, smart grid integration, and policy interventions will not only improve industrial efficiency but also contribute to economic sustainability and energy security. Future developments should focus on strengthening grid resilience, enhancing energy forecasting models, and adopting digital technologies to optimize power consumption and distribution.

References

1. Modeling of structural elements of the energy-economic model «Electric network - electric consumer» [Text] : Monograph / M. Tryputen, V. Kuznetsov, V. Kovalenko, V. Artemchuk, S. Levchenko. Karlsruhe, 2024. 138 p. DOI: 10.30890/978-3-98924-021-6.2024

УДК 621.313.333

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Д. Климчук, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Абузяров, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СИСТЕМ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА, ЩО ПРАЦЮЄ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Системи нерегульованого асинхронного електропривода займають важливе місце в сучасних промислових процесах завдяки їх простоті конструкції, надійності та відносно низькій вартості обслуговування. Такі приводи широко використовуються в насосних агрегатах, компресорних установках, конвеєрних системах, вентиляційних та інших технологічних установках. Водночас, робота цих систем значною мірою залежить від якості електроенергії, що подається в мережу. Несприятливі фактори, такі як гармонічні спотворення, асиметрія фаз, нестабільність напруги та імпульсні перенапруги, можуть суттєво впливати на робочі характеристики асинхронних двигунів, викликаючи збільшення втрат енергії, перегрівання обмоток, зниження ефективності та навіть передчасні виходи з ладу [1].

Робота асинхронного електропривода в умовах неякісної електроенергії є серйозною проблемою для промислових підприємств, оскільки такі умови не лише знижують ефективність енергоспоживання, а й спричиняють додаткові витрати на обслуговування та заміну обладнання. Наявність гармонік у мережі може спричиняти перегрівання двигунів, підвищені механічні навантаження на вал, зниження моментних характеристик та підвищену вібрацію, що у свою чергу може скоротити термін експлуатації обладнання. Тому дослідження роботи електроприводів у подібних умовах є важливим напрямом для підвищення ефективності промислових процесів.

Однією з головних проблем є зміна рівня напруги живлення, яка безпосередньо впливає на робочі характеристики двигуна. Падіння напруги навіть на 5-10% може спричинити значне зниження обертального моменту, що в умовах промислового обладнання призведе до нестабільної роботи, втрати синхронізації або навіть аварійної зупинки механізмів. З іншого боку, підвищення напруги понад номінальні значення викликає збільшення магнітного потоку, що веде до перенавантаження обмоток та зростання втрат активної потужності. У реальних умовах експлуатації зміни напруги можуть бути непередбачуваними та мати значну амплітуду, що ускладнює підтримку стабільної роботи двигуна [2].

Ще одним негативним фактором є фазова асиметрія, що виникає внаслідок нерівномірного розподілу навантаження між фазами, поганої якості електропостачання або дисбалансу в мережі. Дослідження показують, що навіть невелика асиметрія напруги (близько 3-5%) може викликати перегрівання ротора, збільшене споживання реактивної потужності та зниження вихідної механічної потужності двигуна. У промислових умовах це призводить до втрати продуктивності виробництва, підвищеного зносу обладнання та необхідності проведення додаткових технічних обслуговувань [3].

Важливим аспектом є наявність гармонічних складових у мережі, що можуть виникати внаслідок роботи силової електроніки, частотних перетворювачів, потужних імпульсних навантажень. Гармоніки високого порядку призводять до зростання струмових навантажень в обмотках двигуна, збільшення втрат активної потужності та механічного зносу. Високий рівень гармонічних спотворень може також негативно впливати на точність керування приводами та викликати нерівномірну роботу механізмів.

Окрему проблему становлять імпульсні перенапруги, що виникають унаслідок комутаційних процесів у мережі, роботи потужних електродвигунів або електричних розрядних пристроїв. Короткочасні імпульсні стрибки напруги можуть досягати значних значень, що спричиняє пошкодження ізоляції обмоток двигунів, вихід з ладу електронних компонентів керування та призводить до непередбачуваних аварійних відключень. Висока частота таких імпульсів може призводити до деградації матеріалів ізоляції, що з часом зменшує надійність роботи електроприводів [4].

Для мінімізації негативного впливу неякісної електроенергії на роботу нерегульованих асинхронних електроприводів можуть бути використані різні методи компенсації. Серед найбільш ефективних заходів – установка активних фільтрів потужності, що дозволяють усувати гармонічні складові та стабілізувати напругу. Застосування стабілізаторів напруги допомагає підтримувати необхідний рівень живлення, що особливо важливо в умовах частих змін у мережі. Використання пристроїв компенсації реактивної потужності дозволяє зменшити навантаження на систему електропостачання та підвищити ефективність роботи електроприводів.

Автоматизовані системи моніторингу якості електроенергії також відіграють важливу роль у покращенні експлуатаційних характеристик асинхронних двигунів. Такі системи дозволяють аналізувати поточні параметри електропостачання, виявляти відхилення від номінальних значень та своєчасно коригувати режими роботи електропривода. Використання таких рішень дозволяє значно знизити рівень енергоспоживання, підвищити ресурс роботи двигунів та зменшити ризик аварійних ситуацій.

Впровадження комплексного підходу до покращення роботи нерегульованих асинхронних електроприводів дозволяє не лише підвищити енергоефективність, але й скоротити витрати на ремонт та обслуговування обладнання. Дослідження підтверджують, що впровадження заходів із компенсації негативних факторів дозволяє зменшити втрати електроенергії на 15-20%, подовжити термін експлуатації електродвигунів на 25-30% та покращити загальну продуктивність промислових механізмів.

Таким чином, дослідження роботи нерегульованих асинхронних електроприводів в умовах неякісної електроенергії є надзвичайно важливим для промислових підприємств. Використання сучасних методів аналізу параметрів мережі, впровадження автоматизованих систем моніторингу та застосування компенсуючих пристроїв дозволяють значно покращити стабільність роботи обладнання, підвищити його ефективність та знизити ризики аварійних ситуацій. Подальші дослідження в цій галузі повинні бути спрямовані на розробку нових адаптивних алгоритмів управління електроприводами, що враховуватимуть особливості неякісної електроенергії та забезпечуватимуть максимально ефективну роботу систем промислового електропривода.

Перелік посилань

1.Working Group on Fast Transfer of Motors, IAS-PSPC, “Source Transfer and Reclosing Transients in Motors: A Preliminary Working Group Report,” IEEE 1982 Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, pp. 43–50

2.O. C. N. Souto, J. C. De Oliveira, L. M. Neto and P. F. Ribeiro, "Power quality impact on performance and associated costs of three-phase induction motors," *8th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Proceedings (Cat. No.98EX227)*, Athens, Greece, 1998, pp. 791-797 vol.2, doi: 10.1109/ICHQP.1998.760143.

3.J. Barros, M. de Apraiz and R. I. Diego, "On-line monitoring of electrical power quality for assessment of induction motor performance," *2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, Miami, FL, USA, 2009, pp. 1140-1145, doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075347.

4. P.Preecha, J.Dejvises, S. Chusanapiputt, and S.Phoomvuthisam, "A Temperature Calculation and Prediction of A Three-phase Induction Motor With Non sinusoidal Voltage Supply", 2004 lntematlonal Conference on Power System Technology POWERCON 2004 Singapore, 21-24 November 2004.

УДК 662.767

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Д. Коломієць, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Д. Причиненко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОТРИМАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЗВАЛИЩНОГО БІОГАЗУ

Використання звалищного біогазу є одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності та зменшення викидів парникових газів у навколишнє середовище. Біогаз, що утворюється внаслідок анаеробного розкладу органічних відходів на полігонах, є джерелом енергії, яке може бути використане для виробництва електроенергії, теплової енергії або в якості палива. Впровадження сучасних технологій збору, очищення та утилізації біогазу сприяє раціональному використанню відходів та підвищенню енергетичної незалежності підприємств і населених пунктів.

У світі спостерігається зростання використання біогазових технологій, що пов'язано із глобальними тенденціями до зменшення викидів вуглекислого газу та зменшення залежності від викопного палива. Згідно з дослідженнями Європейської агенції з навколишнього середовища, використання біогазу може скоротити викиди CO_2 до 20% у промисловості та до 50% у транспортному секторі при заміщенні традиційних видів палива [1].

Отримання звалищного біогазу залежить від ефективності систем збору, герметизації полігонів та контролю процесів біодеградації. Вдосконалення інженерних рішень, таких як використання спеціальних газозбірних систем, дренажних трубопроводів і газових свердловин, дозволяє підвищити рівень вилучення біогазу до 60-80% від загального потенціалу метаногенезу. На сучасних полігонах для відходів застосовуються геомембранні покриття, які дозволяють ефективно контролювати процес виділення газу та зменшувати його дифузію в атмосферу.

Очищення біогазу є важливим етапом його підготовки до використання. Вміст домішок, таких як сірководень, діоксид вуглецю та водяна пара, може знижувати ефективність його застосування. Використання сучасних технологій очищення, зокрема адсорбційних і мембранних методів, дозволяє підвищити якість біогазу та розширити спектр його використання, включаючи подальше виробництво біометану. В Європі понад 70% біогазових станцій використовують технології зворотного осмосу для очищення біогазу перед його подачею в газорозподільні мережі [2].

Використання звалищного біогазу може здійснюватися шляхом його спалювання в когенераційних установках, що дозволяє одночасно отримувати електричну та теплову енергію. Когенераційні системи мають високий рівень енергоефективності та дозволяють використовувати до 90% енергетичного потенціалу біогазу. Дослідження показують, що впровадження подібних технологій може забезпечити скорочення викидів парникових газів до 30-50% у порівнянні з традиційними методами утилізації відходів. За оцінками Агентства з охорони довкілля США, у 2022 році завдяки когенераційним системам було згенеровано понад 20 ТВт·год електроенергії лише з біогазових ресурсів [3].

Перспективним напрямом є інтеграція біогазових станцій у загальну систему енергопостачання, що сприяє підвищенню стабільності та надійності електромереж. Використання біогазу як палива для транспорту також розглядається як один із шляхів декарбонізації транспортного сектору. Досвід країн Європейського Союзу свідчить, що біометан, отриманий зі звалищного газу, може заміщувати традиційні види палива, сприяючи

зниженню рівня викидів CO_2. У Данії, наприклад, близько 25% автобусів на громадському транспорті вже працюють на біометані.

Економічний аспект впровадження біогазових технологій також є важливим фактором. Дослідження показують, що окупність інвестицій у системи збору та очищення біогазу становить від 5 до 7 років, залежно від масштабів виробництва та рівня державної підтримки. Державні програми стимулювання, такі як субсидії на установку біогазових станцій та знижені податки на відновлювану енергію, значно прискорюють розвиток цієї галузі.

Підвищення ефективності отримання та використання звалищного біогазу є важливим завданням для розвитку екологічно чистої енергетики та оптимізації управління відходами. Вдосконалення систем збору та очищення біогазу, застосування когенераційних установок та інтеграція біогазових станцій у загальну енергетичну систему дозволяє значно покращити ефективність використання цього ресурсу. Крім того, використання біогазу в транспортному секторі відкриває додаткові можливості для зменшення залежності від викопного палива [4].

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку нових технологій утилізації біогазу та підвищення його енергетичної цінності. Інтеграція цифрових технологій у процеси моніторингу та управління біогазовими станціями дозволить підвищити ефективність використання цього ресурсу. Враховуючи глобальні тренди щодо зменшення викидів парникових газів та переходу на відновлювані джерела енергії, розвиток біогазової енергетики може стати одним із стратегічних напрямів сталого розвитку енергетичної сфери.

Перелік посилань

1. Jewell W.J., Morris F.R.,Price D.R., Gunkel W.W., Williams D.W., Loehr R.C. Methane Generation from Agricultural Wastes: Reviw of Concept and Future Applications, Cornell University, Ithaca, New York, 1974.

2. Голуб Г.А. Сучасні тенденції розвитку біогазових установок / [Голуб Г., Войтенко В., Рубан Б, Єрмоленко В.]: Техніка і технології АПК. - 2012. - № 2 (29). - С. 18-21.

3. Amon T., Kryvoruchko V., Amon B., Buga S., Mayer K., Zollitsch W., Potsch E. (2003): Biogas aus Kleegras, Feldfutter- und Dauerwiesenmischungen. Der fortschrittliche Landwirt, 22, 52-53

4. Кухарець С.М., Голуб Г.А. Обґрунтування енергетичних витрат на привід обертового реактора біогазової установки. - Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: Збірник наукових праць / ДНУ "УкрНДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для с.-г. виробництва імені Леоніда Погорілого" (УкрНДІПВТ ім. Л. Погорілого); Редколегія: Кравчук В.І. (головний редактор) та інші - Дослідницьке, 2014. - Вип. 18 (32), книга 2. - 387 с. - С. 356-364

УДК 621.315.2

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Гридасов, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
А. Колосок, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА НАДІЙНОСТІ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ СТРУМОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

Надійність та ефективність експлуатації кабельних ліній електричних мереж відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного електропостачання споживачів. В умовах зростання навантажень, спричинених підключенням нових потужностей та зміною характеру електроспоживання, питання підвищення стійкості кабельних ліній до струмових перевантажень набуває особливої актуальності. Перевантаження можуть спричиняти перегрів кабелів, деградацію ізоляції та передчасний вихід з ладу мережевої інфраструктури. Дослідження показують, що в середньому 25–30% пошкоджень кабельних ліній виникають внаслідок перевантажень та перегріву, що підвищує експлуатаційні витрати на ремонт та заміну обладнання.

Впровадження сучасних методів моніторингу стану кабельних ліній, використання матеріалів з покращеними термічними характеристиками та застосування адаптивних систем керування навантаженням дозволяють підвищити довговічність та надійність електричних мереж. Нові підходи до управління кабельними лініями сприяють зниженню витрат енергії, зменшенню втрат у системі та підвищенню загальної ефективності функціонування електромереж [1].

Струмові перевантаження в кабельних мережах виникають через збільшення потужності споживання, неадекватний розрахунок навантажень або аварійні ситуації у мережі. Основним наслідком є підвищення температури кабелів, що спричиняє старіння та деградацію матеріалів ізоляції, збільшення втрат електроенергії, підвищення ризику коротких замикань та аварійних відключень. Дослідження підтверджують, що перегрівання кабельної ізоляції вище 90°C може скоротити її термін експлуатації на 40–50%, що є критичним фактором для довготривалої роботи мереж.

Використання термостійких матеріалів, зокрема ізоляції на основі зшитого поліетилену (XLPE), сприяє підвищенню допустимих температур експлуатації кабелів, що дозволяє зменшити ризики перегріву та продовжити термін служби до 30–40 років. Автоматизовані системи керування навантаженням сприяють рівномірному розподілу електроенергії між різними ділянками мережі, що дозволяє уникнути перевантаження окремих сегментів.

Оптимізація режимів експлуатації здійснюється через математичне моделювання та аналіз навантажень у реальному часі. Інтелектуальні системи прогнозування, що використовують алгоритми машинного навчання, дозволяють передбачати перевантаження та вживати відповідних заходів. Це дає змогу зменшити аварійність кабельних ліній на 30–40%, що підтверджують аналітичні дослідження енергетичних компаній [2].

Теплова модернізація кабельних трас включає використання оболонок із покращеною теплопровідністю, спеціальних кабельних лотків, систем природного та примусового охолодження. Системи з автоматичним моніторингом температурного режиму дозволяють оперативно реагувати на підвищення температури та змінювати режими роботи мережі. Дослідження показують, що застосування нових термоізоляційних матеріалів дозволяє знизити ризик перегріву на 20–25%, що позитивно впливає на надійність всієї системи.

Використання інноваційних підходів до керування кабельними лініями дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та підвищити загальну ефективність мереж. Наприклад, у європейських країнах застосування інтелектуальних систем керування енергетичними потоками дозволило скоротити витрати на технічне обслуговування кабельних мереж на 15–20% [3].

Аналітичні дані демонструють зростання аварійних ситуацій, спричинених струмовими перевантаженнями, та ефективність сучасних методів їхньої мінімізації. Гістограма нижче (рис.1) відображає порівняння кількості аварій у кабельних мережах до та після впровадження інтелектуальних систем керування [3]:

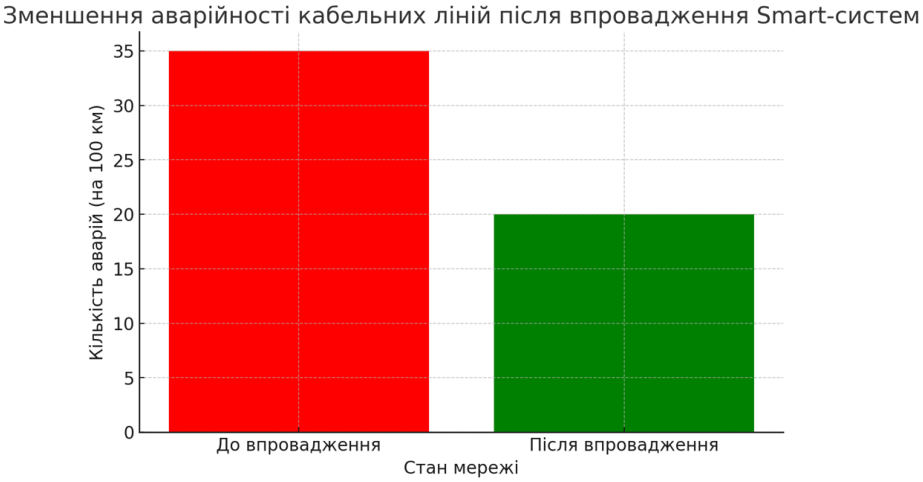


Рис.1 Порівняння кількості аварій у кабельних мережах до та після впровадження інтелектуальних систем керуван

Інша гістограма (рис.2) показує економію витрат на обслуговування мереж після застосування систем моніторингу та терморегулювання:

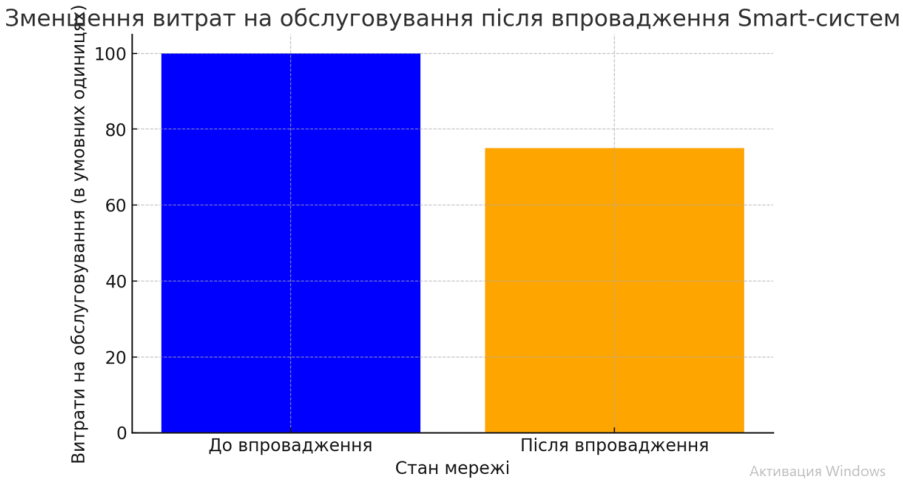


Рис. 2 Економія витрат на обслуговування мереж після застосування систем моніторингу та терморегулювання

За результатами аналізу, використання сучасних рішень дозволяє скоротити аварійність та зменшити фінансові витрати на обслуговування електромереж. Дані підтверджують доцільність інтеграції технологій моніторингу та прогнозування в системи управління електромережами.

Підвищення ефективності експлуатації кабельних ліній електричних мереж в умовах струмових перевантажень є стратегічним напрямком розвитку енергетичної інфраструктури. Використання сучасних технологій моніторингу, вдосконалених матеріалів та адаптивних

систем керування навантаженням дозволяє мінімізувати негативний вплив перевантажень, продовжити термін експлуатації кабелів та підвищити загальну ефективність електромереж. Аналітичні дослідження підтверджують, що впровадження інноваційних рішень у кабельній інфраструктурі забезпечує довгострокове зниження витрат на ремонт та обслуговування мереж, що особливо важливо в умовах зростаючого попиту на електроенергію [4].

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку нових методів підвищення термостійкості кабельних трас, удосконалення алгоритмів прогнозування навантажень та розширення можливостей автоматизованих систем керування на основі штучного інтелекту. Інтеграція цих підходів сприятиме підвищенню стабільності електропостачання та зменшенню експлуатаційних витрат у довгостроковій перспективі.

Перелік посилань

1. Головатюк М.О. та інші Експлуатація кабельних ліній електропередач. Навчальний посібник.-Вінниця: ВНТУ.2009.-109 с.
2. Варецький Ю. О. "Метод оцінки втрат потужності у кабелях низької напруги промислових електричних мереж" ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНІ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНІ СИСТЕМИ. № 1 (4), 2021 с.17-26. http://doi.org/10.23939/sepes2021.01.017
3. O’Connell K., Barrett M., Blackledge J. & Sung A. Cable Heating Effects due to Harmonic Distortion in Electrical Installations, Proceedings of The World Congress on Engineering, 2012, pp. 934–938. DOI:10.21427/D79C0S.
4. Patil K. and Gandhare W. Effects of harmonics in distribution systems on temperature rise and life of XLPE power cables, Power and Energy Systems (ICPS), 2011 International Conference, 2011, pp. 1–6. DOI:10.1109/ICPES.2011.6156680.

УДК 620.178

Сергій Куліков, аспірант кафедри «Електротехніка та електромеханіка»
Український державний університет науки і технологій
Устименко Дмитро к.т.н., доц. кафедри «Електротехніка та електромеханіка»
Український державний університет науки та технологій

ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОШУВАННЯ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ КОНТАКТІВ

Зношування струмознімальних контактів є однією з ключових проблем у сфері електротранспорту та енергетики. Даний процес призводить до погіршення електропровідності, підвищення енергетичних втрат та збільшення ризику відмови обладнання. Сучасні наукові досягнення спрямовані на розробку інноваційних методів контролю та прогнозування зношування, що дозволяють підвищити ефективність роботи електротехнічних систем. У даних тезах розглянуто сучасні підходи до моніторингу стану контактних пар, а також методи прогнозування їх довговічності. Розширене дослідження охоплює глибший аналіз фізико-механічних процесів, які впливають на зношування, методи оцінки технічного стану та перспективи їх впровадження у практику.

Останніми роками було розроблено низку методів контролю зношування контактних пар. Візуальні та спектральні методи аналізу дозволяють отримати детальну інформацію про процеси деградації матеріалів. Використання оптичних та електронних мікроскопів сприяє точній оцінці змін у структурі контактних поверхонь, а спектральний аналіз допомагає визначити склад зношених частинок та виявити аномалії в матеріалі. Аналізуючи отримані результати, можна розробити рекомендації щодо вибору матеріалів із підвищеною зносостійкістю та оптимізації конструкцій струмознімальних контактів [1].

Акустико-емісійний контроль заснований на реєстрації акустичних хвиль, які виникають у процесі тертя та руйнування матеріалу. Цей метод дозволяє виявити початкові стадії зношування та спрогнозувати термін служби контактних елементів. Важливим аспектом є розробка спеціальних датчиків, здатних фіксувати зміни акустичних характеристик матеріалу в режимі реального часу. Результати аналізу таких сигналів можуть використовуватися для створення прогнозних моделей, що дозволять оцінювати динаміку процесу зношування і своєчасно вживати заходів щодо його мінімізації.

Теплова діагностика є ще одним ефективним методом оцінки стану контактних елементів. Інфрачервона термографія дозволяє вимірювати температурні параметри контактних пар у процесі експлуатації. Надмірне нагрівання свідчить про підвищене зношування, що може сигналізувати про необхідність заміни контактного елемента або зміну режиму його експлуатації. Інтеграція тепловізійного моніторингу у системи технічного обслуговування електротранспорту може значно підвищити надійність роботи таких систем, мінімізуючи ризики аварійних ситуацій [2].

Сенсорні системи та аналіз електричних параметрів дозволяють контролювати зміну електропараметрів у контактних з'єднаннях. Використання датчиків напруги та сили струму дає змогу виявляти тенденції до деградації та прогнозувати можливі відмови. Постійний моніторинг параметрів електропередачі дозволяє отримувати вичерпну інформацію про зміну стану контактних поверхонь і забезпечує можливість швидкого реагування на негативні зміни в експлуатаційних умовах.

Математичне моделювання та штучний інтелект відкривають нові перспективи в аналізі процесів зношування струмознімальних контактів. Використання методів машинного навчання допомагає аналізувати великі масиви даних, отримані в процесі моніторингу, та будувати прогностичні моделі. Нейронні мережі можуть бути навчені на основі історичних даних про зношування контактних пар і використовуватися для автоматичного прогнозування їх залишкового ресурсу. Поєднання цих технологій з сенсорними системами забезпечує

високий рівень автоматизації контролю і дозволяє значно знизити витрати на технічне обслуговування електротранспорту [3].

Комплексний підхід до контролю та прогнозування зношування струмознімальних контактів включає інтеграцію кількох методів у єдину систему моніторингу. Розробка адаптивних алгоритмів управління на основі отриманих даних сприятиме підвищенню ефективності експлуатації електротехнічних систем. Важливим напрямком є також розробка нових матеріалів для контактних елементів, які матимуть підвищену стійкість до механічних та електричних навантажень. Перспективними є дослідження в галузі використання композитних матеріалів, нанотехнологій та покриттів із підвищеною зносостійкістю [4,5].

Інноваційні методи контролю та прогнозування зношування струмознімальних контактів відіграють ключову роль у забезпеченні надійності та безперебійної роботи електротранспорту та енергетичних систем. Використання сучасних технологій, таких як акустико-емісійний аналіз, тепловізійна діагностика, сенсорні системи та штучний інтелект, дозволяє значно підвищити точність оцінки технічного стану контактних пар. Подальші дослідження в даній сфері мають бути спрямовані на створення інтегрованих систем моніторингу, які забезпечать своєчасне виявлення ознак деградації та продовження терміну служби контактних елементів. Крім того, удосконалення матеріалів і конструкцій струмознімальних пристроїв стане важливим кроком у підвищенні їх довговічності та ефективності експлуатації.

Література

1. Гончарук Д.А., Баглюк Г.А., Хоменко О.І., Новиченко В.М., Грипачевський О. М. Структура і властивості матеріалів Fe—Al—Ga в області концентрацій, збагачених залізом (2024) Успіхи матеріалознавства, #8/9, Київ: ІПМ ім.І.М.Францевича НАН України, С.97-111. DOI: https://10.15407/materials2024.08-09.010

2. Мінаков М.В., Блощаневич О.М., Подрезов Ю.М., Марченко Н.М., Шуригін Б.В., Стегній А.І. (2024) Структура та властивості поверхневих шарів деформованого цирконію, легованого Nb, Mo та B шляхом лазерної обробки поверхні Успіхи матеріалознавства, #8/9, Київ: ІПМ ім.І.М.Францевича НАН України, С.30-40. DOI: https://10.15407/materials2024.08-09.003

3. Ванкевич, П. І. (2016). Дослідження динамічних характеристик паразитних сигналів у системах вимірювального контролю рухомих елементів механізованих засобів військової техніки. *Військово-технічний збірник*, (14), 127-132.

4. Ванкевич, П. І., Іваник, Є. Г., & Сікора, О. В. (2017). Методика контролю теплового стану вузлів і агрегатів військової техніки стаціонарно вмонтованими діагностичними пристроями. *Військово-технічний збірник*, (17), 3-9.

5. N. Zhou, and W. Zhang, «Investigation on dynamic performance and parameter optimization design of pantograph and catenary system», Finite Elements in Analysis and Design, №47, p. 288 – 295, 2011

УДК 620.178

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНОШУВАННЯ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ КОНТАКТІВ

Сергій Куліков, аспірант кафедри «Електротехніка та електромеханіка»
Український державний університет науки і технологій
Устименко Дмитро к.т.н., доц. кафедри «Електротехніка та електромеханіка»
Український державний університет науки та технологій

Зношування струмознімальних контактів є одним із найважливіших факторів, що впливають на ефективність та довговічність електротранспортних і енергетичних систем. Визначення рівня зношування дозволяє своєчасно проводити технічне обслуговування, запобігати виходу з ладу обладнання та мінімізувати експлуатаційні витрати. Використання експериментальних методів дослідження сприяє глибокому розумінню механізмів деградації матеріалів контактів, оптимізації їх складу і геометрії, а також впровадженню ефективних заходів щодо підвищення їх зносостійкості.

Сучасний розвиток науки та техніки дозволяє використовувати широкий спектр методів контролю, які включають як традиційні механічні випробування, так і інноваційні методи на основі сенсорних технологій, штучного інтелекту та математичного моделювання. Розвиток цих підходів дозволяє значно підвищити точність діагностики, що, у свою чергу, сприяє оптимізації процесу експлуатації та технічного обслуговування контактних пар.

Одним із ключових напрямків дослідження зношування є застосування лабораторних випробувань, що дозволяють відтворювати умови реальної експлуатації контактних пар. Для цього використовуються спеціальні триботехнічні стенди, які імітують механічне тертя, електричні навантаження та вплив навколишнього середовища. Дослідження проводяться з використанням контрольованих параметрів, таких як швидкість ковзання, контактний тиск і струмове навантаження [1].

Оптична та електронна мікроскопія широко застосовується для аналізу поверхонь контактів після випробувань. Ці методи дозволяють дослідити мікроструктурні зміни, виявити мікротріщини, вигорання матеріалу та інші дефекти, що впливають на зносостійкість. Аналіз хімічного складу зношених частинок за допомогою спектрального аналізу допомагає ідентифікувати процеси окислення та дифузії матеріалів у зоні контакту. Додатково проводяться рентгеноструктурні дослідження, які дозволяють оцінити фазові перетворення у матеріалах контактних елементів.

Акустико-емісійна діагностика є перспективним методом дослідження, який ґрунтується на реєстрації акустичних хвиль, що виникають у процесі тертя та мікроруйнування контактних поверхонь. Визначення характеристик таких сигналів дозволяє не лише виявити початкові стадії зношування, але й прогнозувати його розвиток у динаміці. Використання високочутливих сенсорів дозволяє з високою точністю визначати джерела акустичних сигналів та розрізняти різні механізми руйнування.

Методи тепловізійного аналізу дають змогу оцінити рівень нагріву контактних поверхонь під час роботи. Надмірне нагрівання може свідчити про підвищене зношування або про порушення електропровідності. Використання інфрачервоної термографії дозволяє швидко виявити аномальні температурні зони, що є індикаторами несправностей. Додатково аналізуються зміни теплового поля у динаміці, що дозволяє оцінити швидкість зношування та можливі точки перегріву [2].

Електричні методи контролю базуються на аналізі зміни електричного опору та падіння напруги на контактних парах. Збільшення опору контакту є ознакою деградації його поверхні, що може призводити до підвищеного нагрівання та втрат енергії. Дослідження цих параметрів у реальному часі дозволяє оперативно оцінювати стан контактних елементів і запобігати аварійним ситуаціям. Для підвищення точності вимірювань використовуються комбіновані методи, що поєднують аналіз електропараметрів із фізико-хімічними дослідженнями [3].

Комплексний підхід до визначення зношування передбачає поєднання кількох методів контролю в єдину систему моніторингу. Інтеграція сенсорних технологій, машинного навчання та математичних моделей дозволяє створювати адаптивні алгоритми управління станом контактних з'єднань. Використання штучного інтелекту для аналізу великих обсягів даних дає змогу прогнозувати залишковий ресурс контактних елементів і визначати оптимальні терміни їхньої заміни. Крім того, моделювання зношування на основі фізико-механічних закономірностей дає змогу визначати вплив різних факторів на довговічність контактних пар [4].

Перспективним напрямком досліджень є розробка нових матеріалів із підвищеною зносостійкістю та стійкістю до впливу електричних і механічних навантажень. Використання наноструктурованих матеріалів, покриттів із високою термічною стабільністю та самовідновлюваних поверхонь дозволяє значно покращити експлуатаційні характеристики струмознімальних контактів.

Експериментальні методи визначення зношування струмознімальних контактів є важливим інструментом для оцінки їх технічного стану та прогнозування терміну експлуатації. Використання лабораторних випробувань, мікроскопічного аналізу, акустико-емісійного контролю, тепловізійної діагностики та електричних методів дозволяє отримати всебічну інформацію про механізми зношування та розробити ефективні заходи щодо підвищення надійності контактних елементів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих систем моніторингу, які забезпечать своєчасне виявлення ознак деградації та оптимізацію експлуатаційних характеристик струмознімальних пристроїв. Розвиток нових матеріалів та технологій дозволить значно покращити експлуатаційні характеристики контактних пар і підвищити ефективність електротранспорту та енергетичних систем.

Література

1. Гогаєв К.О., Воропаєв В.С., Федоран Ю.О., Євич Я.І., Мінаков М.В., Даниленко М.І. Формування структури та механічних властивостей порошкового матеріалу мідь–залізо під впливом термо–механічної обробки (2024) Порошкова металургія, #07/08, Київ: ІПМ ім.І.М.Францевича НАН України, С.2

2. Martina Grandin, Urban Wiklund Influence of mechanical and electrical load on a copper/copper-graphite sliding electrical contact. Tribology International, 2018. Vol. 121. P. 1-9. DOI: https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.01.004.

3. Тюрнин, П.Г. Обеспечение качественного токосъёма [Текст]/ П.Г. Тюрнин, Н.В. Миронос// Токосъем и тяговое электроснабжение при высокоскоростном движении на постоянном токе: сб. науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ»/ Под ред. Н.В. Мироноса, П.Г. Тюрнина – М.: Интекст, 2010. – С.15-19.

УДК 620.178

Сергій Куліков, аспірант кафедри «Електротехніка та електромеханіка»
Український державний університет науки і технологій
Устименко Дмитро к.т.н., доц. кафедри «Електротехніка та електромеханіка»
Український державний університет науки та технологій

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИПРОБУВАНЬ СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ В УКРАЇНІ

Сильнострумові контакти відіграють ключову роль у забезпеченні надійності роботи електротехнічних та енергетичних систем. Вони піддаються значним електричним і механічним навантаженням, що призводить до їх поступового зношування. В Україні активно розвиваються методи випробувань сильнострумових контактів з метою оцінки їхньої довговічності, електропровідності та термічної стійкості. У даному огляді розглянуто основні методи та технічні засоби, які використовуються для випробувань сильнострумових контактів у вітчизняних лабораторіях та виробництві.

Методи випробувань сильнострумових контактів можна поділити на лабораторні, польові та натурні дослідження. Лабораторні випробування проводяться у спеціально обладнаних випробувальних стендах, що дозволяють контролювати умови експлуатації. Вони включають механічні, електричні та теплові дослідження контактних матеріалів. Польові випробування здійснюються безпосередньо в умовах експлуатації, що дозволяє отримати реальні дані про поведінку контактів під впливом зовнішніх факторів.

Одним із ключових нормативних документів, що регламентують випробування контактних елементів струмоприймачів електрорухомого складу, є ДСТУ ГОСТ 32680:2016 [1]. Цей стандарт встановлює загальні технічні умови для струмознімальних елементів, визначає методи випробувань на зносостійкість, механічну міцність та електропровідність контактних матеріалів. Згідно з ним, контактні елементи піддаються багаторазовим механічним та електричним навантаженням, щоб оцінити їхню довговічність у реальних умовах експлуатації.

Одним із найпоширеніших методів є випробування контактів на електричну ерозію, що передбачає багатократне проходження струму крізь контактну пару з одночасним вимірюванням змін у її поверхневій структурі. Аналізуються показники стабільності електричного опору, рівень перегріву та змін у фізико-механічних властивостях матеріалу. Крім того, згідно з ДСТУ ГОСТ 32680:2016, обов’язковим є контроль температурного режиму, адже перегрів може суттєво впливати на зносостійкість контактного матеріалу.

Методи теплового аналізу також широко використовуються для визначення термостійкості контактів. Вони включають контроль температурних режимів за допомогою інфрачервоної термографії, вимірювання термоелектричного ефекту та моделювання теплових процесів у контактних з'єднаннях. Важливим аспектом є визначення граничних температур, при яких матеріал втрачає свою працездатність.

Для оцінки механічного зношування контактів застосовується мікроскопічний аналіз та триботехнічні випробування. Зокрема, використовується електронна мікроскопія для дослідження мікротріщин та інших структурних дефектів, що виникають у процесі експлуатації. Визначаються також характеристики твердості, міцності та пластичності матеріалів, що безпосередньо впливають на їхній знос.

В Україні функціонують декілька спеціалізованих лабораторій, які займаються випробуваннями сильнострумових контактів. Основні технічні засоби включають сучасні випробувальні стенди для моделювання високих струмових навантажень, що дозволяють тестувати контакти в умовах реальних експлуатаційних режимів. До таких стендів належать установки серії СКТ-100 та ІКС-200, які забезпечують контроль електричної провідності та зносостійкості контактів.

Лазерні та оптичні системи, такі як лазерний мікроскоп KEYENCE VHX-7000, використовуються для детального аналізу зношування контактних поверхонь, тоді як інфрачервоні камери FLIR T640 допомагають моніторити температурні зміни під час проходження струму.

Комп'ютеризовані системи збору даних, зокрема NI CompactDAQ та осцилографи Tektronix DPO7000, реєструють електричні характеристики контакту, включаючи падіння напруги, електричний опір та динаміку струмових коливань. Важливим аспектом є застосування акустико-емісійних систем, таких як Vallen AMSY-6, які фіксують звукові хвилі, що виникають у процесі електричної ерозії. Відповідно до вимог ДСТУ ГОСТ 32680:2016, випробування мають враховувати вплив експлуатаційних факторів, таких як вібрації, тертя та зовнішні кліматичні умови.

В Україні тривають дослідження, спрямовані на вдосконалення методів випробувань сильнострумових контактів. Особлива увага приділяється впровадженню штучного інтелекту та цифрових технологій у процес діагностики. Розробляються автоматизовані системи аналізу контактних з'єднань, що дозволяють прогнозувати термін їх експлуатації на основі великих масивів даних.

Перспективними є також дослідження у сфері використання нових матеріалів із підвищеною стійкістю до електричної ерозії та механічного зношування. Випробування таких матеріалів проводяться із застосуванням багатофункціональних стендів, що імітують реальні умови експлуатації. Також розглядається можливість застосування нанотехнологій у створенні покриттів контактних елементів, що дозволить значно зменшити рівень зношування.

Огляд існуючих методів та технічних засобів випробувань сильнострумового контакту в Україні показав, що у країні існують розвинені системи контролю та діагностики стану контактів. Випробувальні стенди, методи термоаналізу, електронна мікроскопія та акустико-емісійні технології дозволяють отримувати точні дані про процеси зношування та електричну ерозію контактних пар. Важливим нормативним документом, що регламентує ці випробування, є ДСТУ ГОСТ 32680:2016, який визначає загальні технічні умови для струмознімальних елементів електрорухомого складу. Подальший розвиток цієї сфери пов’язаний з інтеграцією цифрових технологій, застосуванням штучного інтелекту та впровадженням нових зносостійких матеріалів для забезпечення більшої ефективності та довговічності електротехнічного обладнання.

Література

1. Струмознімальні елементи контактні струмоприймачів електрорухомого складу. Загальні технічні умови: ДСТУ ГОСТ 32680:2016 (ГОСТ 32680-2014, IDT). – [діє від 01.10.2016], 2016. – 16с.

УДК 621.181.7

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Кутик, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
С. Тимченко , аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

Зростаючий інтерес до відновлюваних джерел енергії та необхідність зниження викидів парникових газів стимулюють розвиток технологій спалювання біогазових сумішей у промислових умовах. Використання біогазу, що утворюється під час анаеробного розкладу органічних відходів, є ефективним способом утилізації метану, який має значний потенціал як паливо для виробництва теплової та електричної енергії. Однак ефективне згоряння біогазу у промислових установках потребує врахування низки факторів, таких як змінний склад газової суміші, оптимізація параметрів згоряння, контроль утворення шкідливих викидів і підвищення ККД процесу.

Оптимізація процесу спалювання біогазових сумішей передбачає використання новітніх технологій підготовки газу, впровадження високоефективних пальникових систем і автоматизованих систем керування горінням. Це дозволяє не тільки підвищити продуктивність промислових установок, але й мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище [1].

Однією з головних проблем при використанні біогазу в промислових системах є його змінний склад, що містить значну кількість домішок, зокрема діоксиду вуглецю (CO_2), сірководню (H_2S) та водяної пари. Високий вміст CO_2 знижує теплоту згоряння, а присутність H_2S спричиняє корозію обладнання та утворення токсичних викидів. Тому перед спалюванням біогаз потребує очищення та осушення, що досягається застосуванням спеціальних фільтрів та абсорбентів для видалення шкідливих компонентів.

Процес горіння біогазу значно залежить від конструкції пальникової системи. Для забезпечення стабільного горіння необхідно враховувати рівномірність подачі газу, оптимальне співвідношення паливо-повітря та ефективність змішування. Використання дифузійних або преміксерних пальників дозволяє досягти рівномірного розподілу температури у камері згоряння, що знижує утворення оксидів азоту (NO_x) та покращує якість процесу згоряння [2.3].

Оптимізація подачі повітря та контроль параметрів горіння є ключовими факторами для підвищення ефективності спалювання біогазу. Автоматизовані системи управління дозволяють динамічно коригувати подачу повітря залежно від поточного складу газу та робочих параметрів котла. Це забезпечує зменшення перевитрат палива, мінімізацію утворення чадного газу (CO) та підвищення загального коефіцієнта корисної дії (ККД) установки.

Інноваційні підходи до спалювання біогазових сумішей передбачають використання комбінованих систем енергопостачання, зокрема когенераційних установок, що дозволяють одночасно отримувати електричну та теплову енергію. Такі технології значно підвищують ефективність використання енергоресурсів, скорочуючи втрати тепла та збільшуючи загальний ККД до 80-90%.

Зменшення шкідливих викидів є ще одним важливим аспектом удосконалення процесу спалювання біогазу. Одним з ефективних методів зниження викидів NO_x є рециркуляція відпрацьованих газів, що дозволяє знижувати температуру горіння та запобігати утворенню

надлишкових оксидів азоту. Крім того, використання каталітичних нейтралізаторів дозволяє ефективно скорочувати кількість викидів CO та H_2S, що покращує екологічні показники виробництва.

Оптимізація процесу спалювання біогазових сумішей у промислових умовах є важливим напрямком розвитку відновлюваної енергетики та підвищення екологічної безпеки. Використання технологій очищення та підготовки біогазу, впровадження високоефективних пальникових систем, автоматизація процесу горіння та застосування когенераційних технологій дозволяють підвищити ККД промислових установок та зменшити шкідливі викиди. Подальші дослідження у цій сфері повинні бути спрямовані на розробку нових каталізаторів для очищення біогазу, вдосконалення систем управління горінням та інтеграцію біогазових технологій у сучасні енергетичні комплекси.

Удосконалення цих процесів сприятиме більш ефективному використанню відновлюваних джерел енергії, зниженню витрат на паливо та покращенню екологічного стану промислових регіонів.

Перелік посилань

1. Економічні й екологічні аспекти комплексної генерації та утилізації енергії в Е 45 умовах урбанізованих і промислових територій: монографія / Під заг. ред. Г.Г. Півняка. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 176 с

2. Звіт про науково-дослідну роботу “Високоефективне використання енергетичного потенціалу геотехнічних систем України: ресурси, енергозберігаючі технології, екобезпека” – за темою НУ/450 – 2009/ОБ – 48 (заключний), № держреєстрації 0109U005905. Інв. № – Дніпропетровськ: НГУ, – 2010

3. Коваленко В.Л., Кузнецова Е.В., Кузнецов В.В. Особливості впровадження біогазових технологій в умовах промислових підприємств металургійної галузі. Теорія і практика металургії. № 5 2019. С.49-54

УДК 621.313.333

Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

Енергоспоживання промислових підприємств є критичним фактором їхньої економічної ефективності та екологічної стійкості. Впровадження систем енергоменеджменту дозволяє суттєво знизити втрати енергії, підвищити продуктивність виробничих процесів та зменшити вплив підприємств на навколишнє середовище. Згідно з дослідженнями, підприємства, що використовують системи енергоменеджменту, можуть скоротити витрати електроенергії на 10-30% завдяки впровадженню автоматизованого моніторингу, оптимізації режимів роботи обладнання та використанню сучасних технологій керування енергоспоживанням.

Одним із ключових методів підвищення енергоефективності є використання інтелектуальних систем моніторингу енергоспоживання, що базуються на технологіях IoT та Big Data. Такі системи дозволяють у режимі реального часу аналізувати параметри енергоспоживання, виявляти відхилення від оптимальних значень та автоматично коригувати режими роботи обладнання. Наприклад, у металургійній промисловості застосування подібних рішень дозволяє зменшити споживання електроенергії в процесах плавлення та прокатки, що забезпечує економію ресурсів і підвищення продуктивності виробництва.

Автоматизовані системи керування енергоспоживанням відіграють важливу роль у зниженні впливу пікових навантажень на електромережу. Вони дозволяють оптимізувати графік роботи обладнання, уникати надмірного споживання електроенергії у періоди високого навантаження та застосовувати технології компенсації реактивної потужності. У великих промислових комплексах впровадження таких систем може знизити експлуатаційні витрати на 15-20%, що особливо важливо для енергоємних підприємств, таких як цементна, хімічна та металургійна промисловість.

Суттєвий внесок у підвищення енергоефективності вносить модернізація технологічного обладнання. Заміна застарілих електродвигунів на енергоефективні моделі з частотними перетворювачами дозволяє знизити споживання електроенергії на 20-40%. Наприклад, у насосних та вентиляційних системах використання частотного регулювання дозволяє зменшити енергоспоживання до 50% завдяки адаптації режимів роботи до реальних потреб.

Ще одним ефективним напрямком є використання відновлюваних джерел енергії та систем зберігання електроенергії. Інтеграція сонячних електростанцій та вітрових генераторів у виробничі процеси дозволяє знизити залежність підприємств від традиційних енергоресурсів, що особливо важливо в умовах зростання цін на електроенергію. Додатково, використання акумуляторних систем енергозбереження допомагає згладжувати пікові навантаження та покращувати стабільність роботи електромережі.

Запровадження стандарту **ISO 50001** є важливим етапом у створенні ефективної системи енергоменеджменту на підприємстві. Цей стандарт передбачає системний підхід до управління енергоспоживанням, що включає аналіз поточного стану, встановлення цільових показників енергоефективності, розробку заходів з оптимізації енергоспоживання та впровадження сучасних технологій моніторингу. Дослідження показують, що компанії, які дотримуються вимог ISO 50001, можуть досягти економії електроенергії на рівні 10-25% завдяки комплексному підходу до управління енергоресурсами.

Перспективи розвитку систем енергоменеджменту в промисловості пов’язані з активним використанням штучного інтелекту та машинного навчання для прогнозування

споживання енергії та оптимізації роботи виробничих процесів. Наприклад, алгоритми штучного інтелекту можуть аналізувати історичні дані про енергоспоживання та автоматично коригувати параметри роботи обладнання відповідно до прогнозованих навантажень. Це дозволяє зменшити втрати електроенергії та підвищити ефективність роботи підприємства без втручання людини.

Таким чином, впровадження систем енергоменеджменту є одним із ключових напрямків підвищення енергоефективності промислових підприємств. Застосування сучасних технологій моніторингу, автоматизації, відновлюваних джерел енергії та інтелектуальних алгоритмів управління дозволяє значно знизити витрати на електроенергію, покращити стабільність виробничих процесів і сприяти екологічній стійкості підприємств. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів оптимізації енергоспоживання, інтеграцію передових цифрових рішень та підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії у промисловості.

Перелік посилань

1. Kuznetsov, V., Nikolenko, A. (2015). Models of operating asynchronous engines at poor-quality electricity, EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. VOL 1, NO 8(73) (2015): ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT. Pages: 37 - 42. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.36755.

2. Kuznetsov Vitaliy, Tryputen Nikolay, Kuznetsova Yevheniia "Evaluating the Effect of Electric Power Quality upon the Efficiency of Electric Power Consumption," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 556-561, doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879841.

УДК 621.313.333

Іван Бережний, студент
Український державний університет науки і технологій
Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

РОЛЬ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) відіграють ключову роль у підвищенні енергоефективності підприємств, забезпечуючи стабільність енергопостачання, зниження витрат на електроенергію та скорочення викидів парникових газів. Інтеграція ВДЕ в промислові процеси дозволяє підприємствам підвищити енергетичну автономність та зменшити залежність від традиційних енергоносіїв. Згідно з дослідженнями, підприємства, що використовують сонячну або вітрову енергію, можуть скоротити споживання електроенергії з зовнішніх мереж на 20-50%, що значно впливає на їхню економічну ефективність.

Сонячна енергетика є одним із найперспективніших напрямів для промисловості, особливо у регіонах із високою сонячною активністю. Використання фотоелектричних панелей на дахах виробничих цехів та складських приміщень дозволяє підприємствам генерувати власну електроенергію та зменшувати навантаження на зовнішню мережу. Наприклад, у металургійній та харчовій промисловості впровадження сонячних електростанцій дозволяє компенсувати значну частину витрат на електроенергію в денний період, коли навантаження на підприємства є найбільшим.

Вітрова енергетика також знаходить застосування на промислових підприємствах, особливо у регіонах із постійними сильними вітрами. Встановлення вітрових турбін дозволяє отримувати додаткове джерело електроенергії та забезпечувати стабільне живлення навіть у періоди пікового споживання. Вітрові установки особливо ефективні для великих промислових підприємств, що розташовані у прибережних зонах або відкритих територіях, де середньорічна швидкість вітру перевищує 5-6 м/с.

Біоенергетика є важливим напрямом для підприємств агропромислового комплексу, харчової та лісопереробної промисловості. Використання біогазових установок, які переробляють органічні відходи у паливо, дозволяє підприємствам виробляти електроенергію та тепло безпосередньо на місці, скорочуючи витрати на енергоресурси та зменшуючи кількість відходів. Наприклад, молокозаводи та м’ясопереробні підприємства можуть використовувати відходи виробництва для генерації біогазу, що забезпечує до 30-40% потреб у власній електроенергії.

Гідроенергетика, хоча й менш поширена на рівні окремих підприємств, може бути ефективним рішенням для великих виробничих об'єктів, розташованих поблизу водних ресурсів. Маленькі гідроелектростанції (міні-ГЕС) можуть забезпечувати електроенергією підприємства, що працюють у важкодоступних регіонах, де традиційні електромережі є нестабільними або надто дорогими для експлуатації.

Інтеграція систем накопичення енергії є важливим доповненням до використання ВДЕ. Оскільки генерація відновлюваної енергії є нестабільною через зміну погодних умов, акумуляторні системи дозволяють підприємствам зберігати надлишки енергії та використовувати їх у періоди пікового навантаження. Використання сучасних літій-іонних батарей дозволяє знизити залежність від зовнішніх постачальників електроенергії та оптимізувати внутрішнє енергоспоживання.

Перехід промислових підприємств на ВДЕ відповідає глобальним тенденціям декарбонізації та сталого розвитку. Впровадження таких рішень дозволяє не лише знизити

викиди CO_2, але й покращити екологічний імідж підприємства, що може бути важливим фактором при роботі з міжнародними партнерами та виході на нові ринки.

Таким чином, використання відновлюваних джерел енергії є стратегічно важливим кроком для забезпечення енергоефективності підприємств. Сонячна, вітрова, біо- та гідроенергетика у поєднанні з системами накопичення енергії дозволяють не лише знизити витрати на електроенергію, а й підвищити енергетичну безпеку, забезпечити стабільність виробництва та зменшити негативний вплив на довкілля. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на вдосконалення технологій зберігання енергії, підвищення ефективності ВДЕ та розробку оптимальних моделей інтеграції відновлюваної енергетики у промислові процеси.

Перелік посилань

1. Kachan Y.G., Kuznetsov V.V., Shram O.A. Minimization of power fluctuations of wind power plants when constructed in exclusion zones of enterprises (2023) Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, (1), pp. 115 - 121, DOI: 10.33271/nvngu/2023-1/115

УДК 621.313.333

Ігор Моря, студент
Запорізький національний університет
Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ЗАСІБ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Автоматизація виробничих процесів відіграє ключову роль у підвищенні енергоефективності підприємств, дозволяючи оптимізувати споживання енергії, зменшити втрати та підвищити продуктивність обладнання. Впровадження сучасних цифрових технологій та систем управління дозволяє не лише знизити витрати на електроенергію, але й покращити контроль над технологічними процесами, зменшуючи вплив людського фактору.

Одним із головних способів зниження енергоспоживання є використання автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП). Такі системи дозволяють у режимі реального часу контролювати параметри роботи обладнання, аналізувати показники енергоспоживання та вносити коригування для оптимальної роботи. Наприклад, у металургійній промисловості АСУ ТП дозволяють регулювати роботу печей, знижуючи споживання електроенергії під час непікових навантажень, що може забезпечити економію до 15-20%.

Використання частотно-регульованих електроприводів (ЧРП) також є одним із найбільш ефективних методів зниження енергоспоживання. Частотні перетворювачі дозволяють регулювати швидкість обертання електродвигунів залежно від потреб виробничого процесу. Наприклад, у насосних та вентиляційних системах використання ЧРП може знизити споживання електроенергії на 30-50%, оскільки обладнання працюватиме лише на необхідному рівні, а не на повну потужність постійно.

Автоматизація освітлення та кліматичних систем на підприємстві також сприяє енергозбереженню. Використання систем "розумного освітлення" із сенсорами руху дозволяє скоротити витрати на електроенергію до 40%, особливо у великих складських приміщеннях та цехах. Автоматизовані системи опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC) дозволяють регулювати мікроклімат у виробничих приміщеннях залежно від часу доби та рівня завантаженості виробництва, що дозволяє скоротити витрати енергії на 20-30%.

Важливим аспектом автоматизації є використання інтернету речей (IoT) та технологій штучного інтелекту (AI) для моніторингу енергоспоживання. IoT-датчики, встановлені на обладнанні, дозволяють збирати великі обсяги даних про реальне споживання енергії та автоматично виявляти неефективні процеси. Алгоритми штучного інтелекту можуть аналізувати ці дані та пропонувати оптимальні сценарії роботи обладнання для мінімізації витрат енергії.

Додатковим засобом підвищення енергоефективності є автоматизовані системи енергоменеджменту (EMS), які інтегрують усі дані про споживання енергії в єдину платформу. Вони дозволяють не лише контролювати витрати електроенергії, а й прогнозувати пікові навантаження, автоматично розподіляючи ресурси для їх зниження. Впровадження таких систем на великих промислових підприємствах дозволяє скоротити витрати енергії на 10-25%.

Автоматизація виробництва також передбачає використання роботизованих систем та автономних технологій, які не лише підвищують точність виробничих процесів, але й сприяють ефективному використанню енергоресурсів. Роботизовані виробничі лінії споживають менше електроенергії завдяки високій точності роботи, відсутності простоїв та оптимальному використанню матеріалів.

Отже, автоматизація виробничих процесів є одним із ключових факторів зниження енергоспоживання на промислових підприємствах. Використання автоматизованих систем керування, частотного регулювання електроприводів, інтелектуальних технологій моніторингу енергії та роботизації виробництва дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії та підвищити ефективність роботи підприємства. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на інтеграцію інноваційних технологій AI, IoT та Big Data для максимальної оптимізації виробничих процесів.

Перелік посилань

1. Борин В. С., Когутяк М. І., Михайлів С. Б. Удосконалення автоматизованої системи керування технологічним процесом масляної десорбції на базі сучасних технічних засобів автоматизації //Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2012. – №. 2.

2. Тичков В. В. и др. Автоматизація виробничих процесів. Технічні засоби автоматизації: навчально-методичний посібник до практичних робіт для здобувачів освітнього ступенів «бакалавр» галузі знань 15 «Автоматизація та приладобудування» та 18 «Виробництво та технології» усіх форм навчання //Черкаси: ЧДТУ. – 2020.

УДК 621.313.333

Олександр Садовой, студент
Запорізький національний університет
Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Цифрові технології стали невід'ємною частиною сучасних промислових підприємств, допомагаючи підвищити енергоефективність, знизити витрати на електроенергію та оптимізувати виробничі процеси. Завдяки розвитку Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI), цифрових двійників (Digital Twin) і хмарних обчислень, компанії отримали змогу прогнозувати споживання енергії та автоматично регулювати навантаження на електромережу.

Сучасні підприємства стикаються з проблемою надмірного споживання енергії, що не лише підвищує витрати, але й створює додаткове навантаження на енергосистему. Оптимізація споживання електроенергії потребує аналізу великої кількості даних, у тому числі історичних трендів, поточних показників навантаження та зовнішніх факторів, таких як зміни цін на енергоносії чи погодні умови. Впровадження цифрових технологій дозволяє підприємствам не лише здійснювати моніторинг енергоспоживання, а й прогнозувати майбутні навантаження, що допомагає знизити пікові витрати та зробити виробництво більш стійким.

Однією з найбільш перспективних технологій у цій сфері є Інтернет речей (IoT), який дозволяє в реальному часі отримувати дані з датчиків, встановлених на обладнанні. Наприклад, сучасні датчики можуть контролювати навантаження на двигуни, виявляючи перевитрати електроенергії або відхилення від оптимального режиму роботи. Завдяки цьому оператори можуть швидко реагувати на аномалії або навіть передбачати можливі несправності. Використання IoT на промислових підприємствах вже дозволило знизити витрати електроенергії на 15-25%, а завдяки подальшому розвитку цієї технології очікується ще більша ефективність.

Важливу роль у прогнозуванні споживання енергії відіграють алгоритми штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML). Вони аналізують великі обсяги даних, визначаючи закономірності та оптимальні режими роботи обладнання. Наприклад, на хімічних заводах AI-моделі можуть прогнозувати енергоспоживання в різних виробничих процесах, автоматично коригуючи параметри роботи систем. Це дозволяє уникати перевантажень у мережі та знижувати енергетичні витрати на 20-30%.

Ще однією передовою технологією є цифрові двійники (Digital Twin) – віртуальні копії реальних виробничих об'єктів або обладнання, які дозволяють моделювати різні сценарії енергоспоживання та знаходити найефективніші рішення. Наприклад, у металургійній промисловості цифрові двійники застосовуються для оптимізації режимів роботи електропечей, що дозволяє зменшити витрати електроенергії на 10-20%.

Хмарні технології та великі дані (Big Data) також відіграють значну роль у підвищенні енергоефективності. Хмарні платформи дозволяють підприємствам централізовано обробляти та аналізувати дані про споживання енергії, швидко реагуючи на зміни та знаходячи можливості для економії. Наприклад, логістичні компанії використовують хмарні системи для управління енергоспоживанням складів, автоматично коригуючи роботу освітлення, кондиціонування та обігріву. Завдяки цьому витрати на електроенергію можуть знижуватися на 15-30%.

Розвиток цифрових технологій також сприяє впровадженню інтелектуальних енергомереж (Smart Grid). Завдяки цим системам підприємства можуть інтегрувати відновлювані джерела енергії та більш ефективно розподіляти електроенергію в межах виробництва. Наприклад, компанії, що використовують Smart Grid, можуть автономно забезпечувати себе електроенергією за допомогою сонячних батарей та акумуляторів, що дозволяє знизити витрати на електроенергію на 25-40%.

Ще одним напрямком є автоматизовані системи управління енергоспоживанням (EMS). Вони інтегрують усі дані про споживання електроенергії в єдину систему, дозволяючи контролювати витрати та оптимізувати роботу обладнання. Наприклад, на автомобільних заводах EMS автоматично вимикає непотрібне обладнання у періоди низького навантаження, що дозволяє скоротити споживання електроенергії на 15-25%.

Крім того, цифрові технології активно використовуються у сфері роботизації. Автоматизовані виробничі лінії та автономні транспортні системи (AGV) дозволяють мінімізувати перевитрати електроенергії, оскільки їхні алгоритми роботи оптимізовані для найменшого енергоспоживання. Наприклад, роботизовані складські комплекси можуть працювати за найкоротшими маршрутами, що дозволяє скоротити витрати електроенергії на логістику на 20-35%.

Впровадження цифрових технологій у прогнозування та оптимізацію енергоспоживання приносить значні вигоди. Підприємства можуть не лише знизити свої витрати на електроенергію, але й уникати перевантажень у мережі, підвищувати стабільність роботи обладнання та зменшувати вплив на довкілля. У майбутньому очікується подальший розвиток цієї сфери, зокрема вдосконалення алгоритмів штучного інтелекту, створення нових цифрових двійників для складних виробничих систем та інтеграція відновлюваних джерел енергії у загальну систему енергопостачання підприємств.

Таким чином, використання цифрових технологій відкриває перед підприємствами широкі можливості для підвищення енергоефективності. Завдяки інтелектуальному управлінню енергоресурсами, точному прогнозуванню споживання та автоматизації виробничих процесів можна досягти значного скорочення витрат і забезпечити стабільну роботу підприємства в умовах мінливого енергетичного ринку.

Перелік посилань

1. Çelebi, H. İ. (2021). Artificial intelligence applications in management information systems: A comprehensive systematic review with business analytics perspective. Artificial Intelligence Theory and Applications, vol. 1(1), pp. 25–56. Available at: https://dergipark.org.tr/en/pub/aita/issue/77113/1290881

2. Kruhse-Lehtonen, U., & Hofmann, D. (2020). How to define and execute your data and AI strategy. Harvard Data Science Review, vol. 2(3). DOI: https://doi.org/10.1162/99608f92.a010feeb

3. Akerkar, R. (2019). Artificial intelligence for business. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-97436-1

УДК 621.313.333

Юрій Ліщук, студент
НТУ «Дніпровська політехніка»
Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Юрій Барабанов, студент
НТУ «Дніпровська політехніка»
Дмитро Ципленков, к.т.н., доц. завідувач кафедри електротехніки
НТУ «Дніпровська політехніка»

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ СТАНДАРТІВ ISO 50001 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

В умовах зростаючої вартості енергоносіїв та посилення екологічних вимог промислові підприємства змушені шукати ефективні способи управління енергоспоживанням. Одним із найбільш ефективних підходів до підвищення енергоефективності є впровадження міжнародного стандарту ISO 50001, який встановлює систему енергоменеджменту для підприємств різних галузей. Цей стандарт допомагає організаціям системно аналізувати споживання енергії, виявляти неефективні процеси та впроваджувати заходи для їхнього вдосконалення.

Основна ідея ISO 50001 полягає в створенні циклічного процесу управління енергоспоживанням, який базується на принципі "Плануй – Виконуй – Перевіряй – Дій" (PDCA). Це означає, що підприємство має постійно аналізувати використання енергії, визначати можливості для підвищення ефективності, впроваджувати відповідні заходи та оцінювати їхню результативність. Такий підхід забезпечує безперервне вдосконалення системи енергоменеджменту, що у довгостроковій перспективі дозволяє досягти значного зниження витрат на електроенергію.

Першим етапом імплементації ISO 50001 є проведення енергетичного аудиту, який дозволяє виявити основні точки надмірного споживання енергії. Аудит включає аналіз технологічних процесів, стану обладнання, рівня втрат електроенергії та можливих шляхів їх усунення. Наприклад, на металургійних заводах аудити часто показують, що значна частина енергії витрачається на застарілі системи вентиляції та охолодження, які можна модернізувати для зниження витрат на 15-20%.

Наступним кроком є розробка енергетичної політики підприємства, яка визначає стратегічні цілі та напрями скорочення енергоспоживання. У межах цієї політики впроваджуються конкретні заходи, такі як модернізація обладнання, встановлення енергоефективних електродвигунів, автоматизація виробничих процесів і впровадження систем моніторингу енергоспоживання. Наприклад, на підприємствах харчової промисловості заміна звичайних насосних станцій на частотно-регульовані дозволяє скоротити витрати електроенергії на 30-40%.

Важливу роль у реалізації ISO 50001 відіграють цифрові технології, зокрема системи моніторингу та аналізу енергоспоживання. Використання Інтернету речей (IoT) дозволяє встановлювати сенсори на виробничому обладнанні, які збирають дані про рівень споживання електроенергії, аналізують тенденції та виявляють неефективні процеси. Наприклад, в автомобільній промисловості такі системи дозволяють виявити пікові навантаження на мережу та оптимізувати графік роботи електропристроїв, що знижує загальні витрати на 20-25%.

Ще одним ефективним інструментом є впровадження систем енергоменеджменту (EMS), які інтегрують усі дані про споживання електроенергії в єдину інформаційну платформу. Це дозволяє підприємствам контролювати витрати в режимі реального часу, прогнозувати енергетичні потреби та розробляти оптимальні стратегії зниження енергоспоживання. Використання EMS на великих логістичних складах дає змогу

автоматично регулювати роботу освітлення, систем опалення та кондиціонування залежно від поточного навантаження, що забезпечує економію до 30% електроенергії.

Одним із ключових принципів ISO 50001 є залучення персоналу підприємства до процесу енергоменеджменту. Це включає навчання співробітників, проведення тренінгів щодо енергоефективності та впровадження системи мотивації для працівників, які пропонують ефективні способи зниження витрат енергії. Наприклад, на хімічних виробництвах проведення тренінгів із раціонального використання сировини та енергоресурсів дозволило зменшити перевитрати електроенергії на 10-15% без додаткових фінансових вкладень.

Крім економічних переваг, впровадження ISO 50001 має вагомі екологічні наслідки. Скорочення енергоспоживання автоматично знижує рівень викидів CO_2, що є важливим аспектом для підприємств, які прагнуть відповідати сучасним екологічним стандартам та корпоративним соціальним відповідальностям (CSR). Наприклад, у європейських країнах компанії, що запровадили ISO 50001, змогли скоротити свої викиди парникових газів на 15-30%, що не лише зменшило їхній екологічний слід, але й допомогло отримати податкові пільги.

Підприємства, які інтегрують стандарт ISO 50001, отримують додаткові конкурентні переваги. Вони можуть брати участь у міжнародних тендерах, де обов’язковою умовою є відповідність стандартам енергоефективності, а також отримувати сертифікацію, яка підвищує довіру з боку інвесторів і партнерів. Наприклад, у машинобудівній галузі компанії, які впровадили ISO 50001, змогли покращити свої позиції на світових ринках та укласти вигідні контракти з екологічно свідомими клієнтами.

Перспективи розвитку енергоменеджменту у промисловості тісно пов’язані з подальшим удосконаленням цифрових рішень, автоматизацією виробничих процесів та інтеграцією відновлюваних джерел енергії. У майбутньому використання штучного інтелекту для аналізу енергоспоживання та прогнозування його динаміки дозволить підприємствам ще точніше визначати оптимальні режими роботи обладнання, мінімізуючи енергетичні витрати.

Таким чином, імплементація ISO 50001 є потужним інструментом для підвищення енергоефективності підприємств. Використання цього стандарту дозволяє не лише зменшити витрати на електроенергію, але й підвищити стабільність виробничих процесів, покращити екологічні показники та зміцнити ринкові позиції компанії. Завдяки системному підходу до енергоменеджменту, підприємства можуть створювати ефективну та стійку енергетичну політику, що сприятиме їхньому довгостроковому розвитку в умовах глобальних змін у сфері енергетики.

Перелік посилань

1. Серветник, Дмитро. "Впровадження вимог стандарту ДСТУ ISO 50001 системи енергетичного менеджменту в діяльність ТОВ «САНРЕЙ СОЛАР»." (2024).

2. Сєрік, Л. А. "Енергоменеджмент і енергосервіс–взаємопов’язані інструменти підвищення енергоефективності." ББК У58 Г52: 466.

УДК 621.313.333

Юрій Ліщук, студент
НТУ «Дніпровська політехніка»
Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Юрій Барабанов, студент
НТУ «Дніпровська політехніка»
Андрій Гребенюк, к.т.н., доцент, викладач вищої категорії, голова циклової комісії електричної інженерії та автоматизації
Дніпровський фаховий коледж енергетичних та інформаційних технологій

ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОАУДИТУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ

Зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних вимог змушують підприємства шукати ефективні методи скорочення енергетичних втрат. Одним із найбільш дієвих підходів до оптимізації споживання електроенергії є впровадження технологій енергоаудиту. Це системний процес аналізу енергоспоживання, спрямований на виявлення неефективних витрат енергії, оцінку поточного стану енергетичних систем та розробку заходів для їхнього вдосконалення.

Енергоаудит дозволяє підприємствам отримати об'єктивну оцінку рівня енергоефективності, що дає можливість приймати обґрунтовані рішення щодо оптимізації роботи обладнання. У сучасних промислових умовах цей процес вже не обмежується лише ручним збором даних, а активно інтегрує цифрові технології, що підвищують точність аналізу та дозволяють автоматизувати багато етапів аудиту.

Сучасні системи енергетичного моніторингу використовують датчики, які безперервно збирають інформацію про рівень енергоспоживання окремих елементів виробничого процесу. Наприклад, використання IoT-рішень дозволяє виявляти непотрібні енергетичні витрати в реальному часі. Якщо певне обладнання продовжує працювати на повну потужність у години мінімального навантаження, автоматизовані системи можуть регулювати його роботу відповідно до фактичних потреб підприємства.

Окрім аналізу поточного стану енергоспоживання, енергоаудит дозволяє оцінити ефективність використання альтернативних джерел енергії. Зокрема, підприємства, що встановлюють сонячні панелі або вітрові турбіни, можуть використовувати результати енергоаудиту для визначення найкращих умов інтеграції цих технологій у свою енергетичну систему. Аналізуючи дані про споживання електроенергії, можна визначити оптимальні сценарії балансування між традиційними та відновлюваними джерелами живлення.

Ефективність впровадження енергоаудиту також значною мірою залежить від використання програмного забезпечення для аналізу енергетичних даних. Спеціалізовані платформи на основі штучного інтелекту можуть не лише аналізувати історичні дані, а й прогнозувати майбутнє споживання енергії з урахуванням змін у виробничих процесах або зовнішніх факторів, таких як температура повітря чи сезонне навантаження на електромережу.

Однією з головних переваг енергоаудиту є можливість розробки детального плану енергозбереження. На основі отриманих даних можна впроваджувати заходи, спрямовані на підвищення ефективності виробничого обладнання, покращення ізоляції будівель, оптимізацію вентиляційних систем та модернізацію освітлення. Наприклад, перехід на світлодіодне освітлення дозволяє скоротити споживання електроенергії до 60%, а використання частотно-регульованих приводів у насосних і вентиляційних системах може знизити витрати енергії на 20-30%.

Регулярне проведення енергоаудиту сприяє не лише зниженню енергетичних втрат, а й підвищенню загальної стабільності роботи підприємства. Виявлення потенційних проблем у

системах електропостачання або теплових мережах дозволяє запобігти аваріям і зменшити витрати на технічне обслуговування.

У майбутньому роль енергоаудиту лише зростатиме завдяки розвитку цифрових технологій. Інтеграція штучного інтелекту та машинного навчання у процеси аналізу енергоспоживання дозволить підприємствам досягати ще більшої точності прогнозування та автоматизації управління енергією. Розширення можливостей використання відновлюваних джерел енергії також стимулюватиме підприємства до активнішого застосування енергоаудиту для забезпечення максимальної ефективності енергетичних систем.

Таким чином, впровадження технологій енергоаудиту є критично важливим кроком для будь-якого підприємства, що прагне скоротити свої витрати на електроенергію та підвищити енергоефективність. Завдяки сучасним цифровим рішенням, підприємства отримують не лише більш точні дані, а й змогу впроваджувати ефективні стратегії енергозбереження, що веде до сталого розвитку та підвищення конкурентоспроможності в умовах змінного енергетичного ринку.

Перелік посилань

1. Момотюк В. В., Козирський В. В. Енергоаудит хлібокомбінату–основа розробки енергозберігаючих технологій і створення інтелектуальної системи управління електротехнологічним комплексом //Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. – 2016. – №. 242. – С. 124-131.

УДК 621.313.333

Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Юрій Ліщук, студент
НТУ «Дніпровська політехніка»
Ігор Мостовенко, студент
Український державний університет науки і технологій
Юрій Барабанов, студент
НТУ «Дніпровська політехніка»
Олексій Бобров, к.т.н., доцент, викладач спеціальних та електротехнічних дисциплін
(Відокремлений структурний підрозділ «Фаховий коледж ракетно-космічного машинобудування Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара»)

РОЗРОБКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ПІДПРИЄМСТВА В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ВАРТОСТІ ЕНЕРГОНОСІЇВ

Зростання вартості енергоресурсів стає серйозним викликом для промислових підприємств, змушуючи їх переглядати свої підходи до управління енергоспоживанням. Висока енергоємність виробничих процесів робить компанії вразливими до коливань цін на електроенергію, газ та інші енергоносії, що вимагає впровадження ефективної енергетичної стратегії.

Енергетична стратегія підприємства – це довгостроковий план дій, спрямований на оптимізацію використання енергоресурсів, зменшення залежності від зовнішніх постачальників і підвищення ефективності виробничих процесів. Вона охоплює комплекс заходів із модернізації обладнання, впровадження цифрових технологій, використання альтернативних джерел енергії та вдосконалення систем енергоменеджменту.

Першим етапом у розробці енергетичної стратегії є аналіз поточного рівня енергоспоживання підприємства. Це включає оцінку витрат на електроенергію, газ та інші ресурси, визначення енергоємних процесів, а також виявлення неефективного використання енергії. Особливу увагу слід приділити втратам у системах опалення, вентиляції, освітлення та електроприводах, оскільки вони можуть становити значну частину загального енергоспоживання. Наприклад, на металургійних комбінатах значна частина витрат на електроенергію припадає на процеси плавлення металу, які можна оптимізувати за рахунок вдосконалення технологій нагріву.

Після аналізу енергетичного стану підприємства формуються стратегічні цілі. Основними пріоритетами є скорочення енергетичних витрат, підвищення ефективності роботи обладнання, впровадження відновлюваних джерел енергії та цифрових технологій для управління енергоспоживанням. Наприклад, перехід на частотно-регульовані електроприводи дозволяє значно скоротити втрати електроенергії, оскільки двигуни працюють у відповідності до реального навантаження.

Модернізація виробничих систем відіграє ключову роль у реалізації енергетичної стратегії. Серед основних заходів варто виділити впровадження енергоефективних двигунів, рекупераційних систем, що дозволяють повторно використовувати тепло, а також автоматизованих систем управління енергоспоживанням. Наприклад, цементні заводи, які використовують технології рекуперації, можуть знизити витрати енергії до 20% завдяки повторному використанню тепла, що виділяється під час виробничих процесів.

Важливим аспектом є інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни та біогазові установки. Використання таких технологій дозволяє підприємствам не лише зменшити витрати на електроенергію, але й підвищити енергетичну

незалежність. У харчовій промисловості, наприклад, біогазові установки можуть переробляти органічні відходи у паливо, забезпечуючи до 50% потреб підприємства в електроенергії.

Цифрові технології також відіграють важливу роль в енергетичній стратегії. Впровадження систем моніторингу та аналізу енергоспоживання на основі Інтернету речей (IoT) дозволяє підприємствам контролювати витрати в режимі реального часу, виявляти аномалії та оперативно реагувати на зміни у навантаженні. Наприклад, у логістичних комплексах автоматизовані системи керування освітленням та кондиціонуванням можуть знижувати витрати на електроенергію на 20-30%.

Автоматизовані системи енергоменеджменту (EMS) дозволяють підприємствам інтегрувати всі енергетичні дані в єдину платформу, що сприяє підвищенню прозорості витрат та більш ефективному управлінню ресурсами. На автомобільних заводах використання таких систем дає змогу оптимізувати графік роботи обладнання, скоротивши енергоспоживання в години пікового навантаження, що дозволяє заощаджувати до 25% електроенергії.

Контроль і регулярний перегляд енергетичної стратегії є невід'ємною частиною її успішної реалізації. Необхідно періодично проводити енергетичний аудит, аналізувати динаміку витрат і коригувати заходи відповідно до змін ринку та технологічних можливостей. Підприємства, які працюють за стандартом ISO 50001, оновлюють свої енергетичні стратегії кожні 2-3 роки, що дозволяє їм підтримувати високу ефективність використання енергоресурсів.

Очікувані результати впровадження енергетичної стратегії включають значне зниження витрат на електроенергію, підвищення незалежності від коливань цін на енергоносії, зменшення викидів CO_2 та покращення конкурентоспроможності підприємства. Завдяки системному підходу до управління енергоспоживанням підприємства можуть досягати економії від 20% до 40% без значного зниження виробничих потужностей.

Розробка та впровадження ефективної енергетичної стратегії є необхідністю для сучасного підприємства. Використання енергоефективного обладнання, впровадження відновлюваних джерел енергії, застосування цифрових технологій та розумне планування дозволяють не лише скоротити витрати, а й забезпечити стабільність роботи в умовах нестабільного ринку енергоресурсів.

Перелік посилань

1. ISO 50001:2018 – Energy management systems – Requirements with guidance for use.
2. Директива від 25.10.2012 № 2012/27/ЄС Про енергоефективність

УДК 620.9

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Д. Осадчий, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
С. Тимченко , аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРОМИСЛОВИМ ПІДПРИЄМСТВОМ

Ефективне використання електричної енергії є ключовим фактором для промислових підприємств, які прагнуть знизити експлуатаційні витрати, підвищити конкурентоспроможність та зменшити вплив на навколишнє середовище. Оптимізація енергоспоживання дозволяє мінімізувати втрати електроенергії, підвищити продуктивність обладнання та знизити витрати на електропостачання. В умовах зростаючих тарифів на електроенергію та впровадження міжнародних стандартів енергоефективності промислові підприємства змушені впроваджувати сучасні методи управління енергоспоживанням.

Серед ключових напрямків підвищення ефективності електроспоживання – модернізація енергетичних систем, впровадження інтелектуальних систем управління споживанням, використання енергоефективного обладнання та перехід на альтернативні джерела енергії. Дослідження підтверджують, що реалізація таких заходів дозволяє скоротити витрати на електроенергію на 15–30%, що має значний економічний ефект.

Підвищення ефективності споживання електроенергії на промислових підприємствах досягається завдяки впровадженню кількох стратегій. Одним із ключових напрямків є модернізація електричних мереж та оптимізація режимів їх роботи. Використання сучасних автоматизованих систем моніторингу та керування дозволяє зменшити втрати енергії за рахунок своєчасного виявлення та усунення перевантажень і неефективного використання електрообладнання. Встановлення частотних перетворювачів на електродвигунах дає можливість регулювати швидкість роботи обладнання відповідно до потреб виробничого процесу, що сприяє зниженню енергоспоживання.

Іншим важливим аспектом є впровадження систем енергоменеджменту, які дозволяють аналізувати поточний рівень споживання, виявляти неефективні ділянки та розробляти стратегії для їх усунення. Використання штучного інтелекту та великих даних у таких системах забезпечує прогнозування майбутніх навантажень та оптимальне планування використання електроенергії. Статистичні дослідження показують, що застосування цифрових систем енергоменеджменту дозволяє знизити енергоспоживання на 10–20% без значних капіталовкладень.

Важливим фактором є перехід на використання енергоефективного обладнання. Заміна застарілих електродвигунів на сучасні моделі з високим коефіцієнтом корисної дії, впровадження світлодіодного освітлення, використання теплоізоляційних матеріалів та систем рекуперації енергії дозволяє суттєво скоротити втрати електроенергії. Досвід європейських країн підтверджує, що такі заходи окупаються в середньому за 3–5 років, що робить їх економічно доцільними навіть для підприємств із середнім рівнем енергоспоживання.

Одним із перспективних напрямків є інтеграція відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові електростанції, у виробничі процеси. Використання локальних джерел енергії дозволяє зменшити залежність від централізованих електромереж, стабілізувати

вартість електроенергії та знизити рівень викидів парникових газів. Впровадження систем зберігання енергії, таких як акумуляторні батареї та гібридні генератори, допомагає забезпечити безперебійне електропостачання навіть у періоди пікових навантажень.

Аналіз показників енергоспоживання на промислових підприємствах свідчить про значний потенціал для оптимізації [1-3].

Станом на 5 листопада 2021 року ціна на електроенергію на оптовому ринку у листопаді складає рекордні 3,11 грн/кВт*год за базове навантаження (рівний графік споживання), 3,86 грн/кВт*год за денне навантаження і 1,61 грн/кВт*год за нічне навантаження (без ПДВ, тарифу на розподіл та передачу) [1].

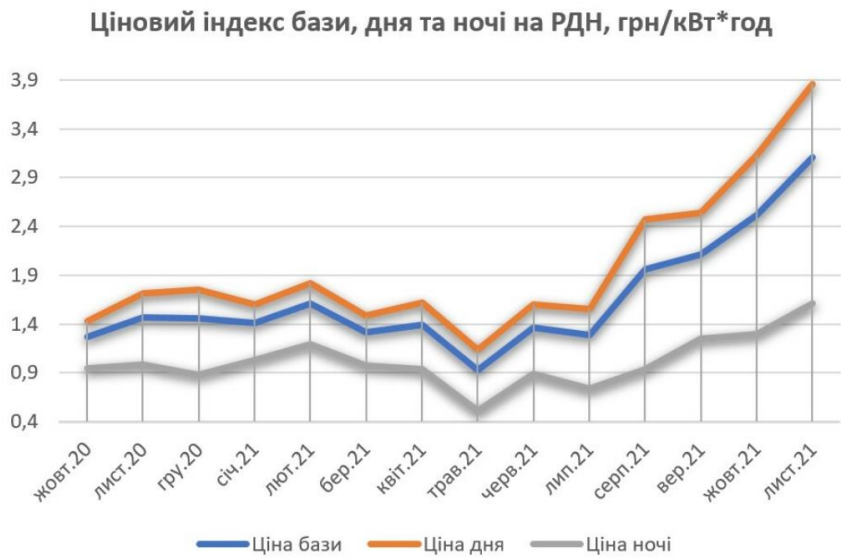


Рисунок 1 Ціновий індекс бази, дня та ночі на РДН [1]

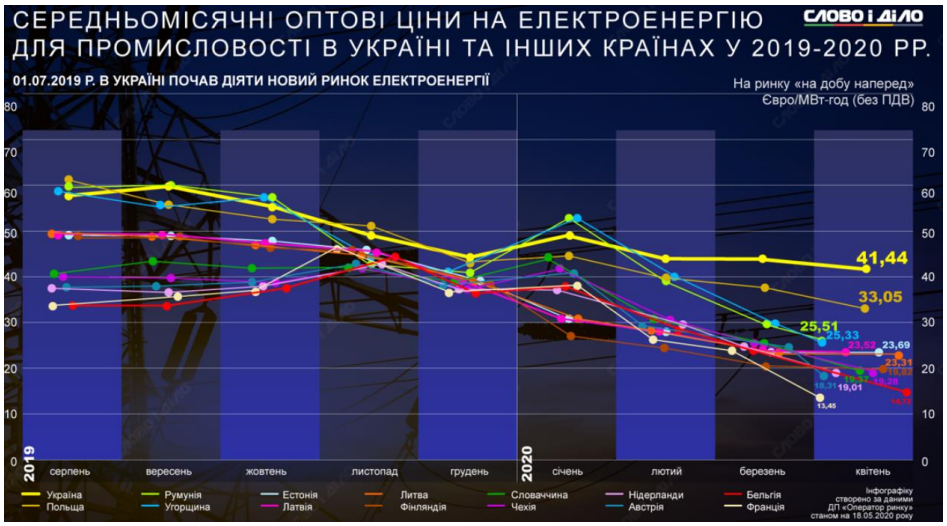


Рисунок 2 Вартість електроенергії для підприємств [2]

Рисунок 3 Тарифи на електроенергію [3]

Наведені нижче гістограми демонструють зміну рівня енергоспоживання після впровадження заходів з енергоефективності (рис.4, рис.5):

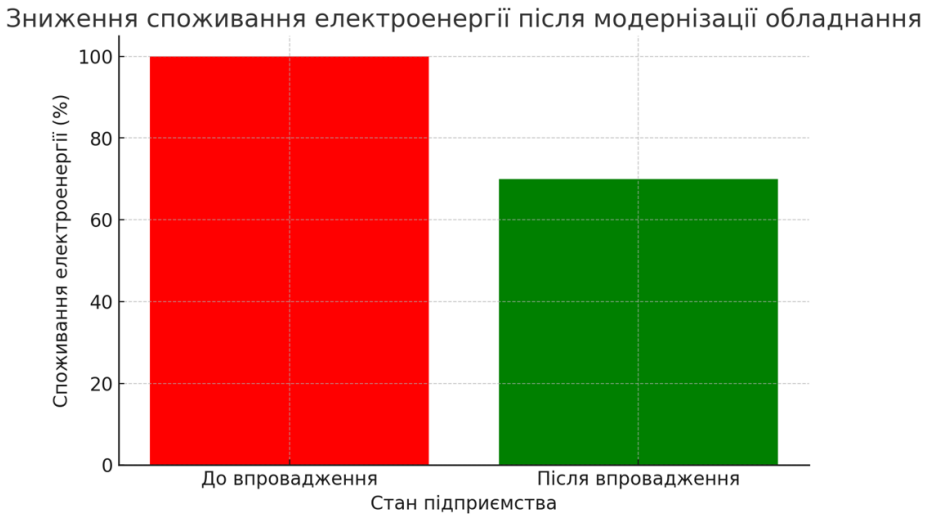


Рисунок 4 Зниженння споживання електроенергії на промисловому підприємстві

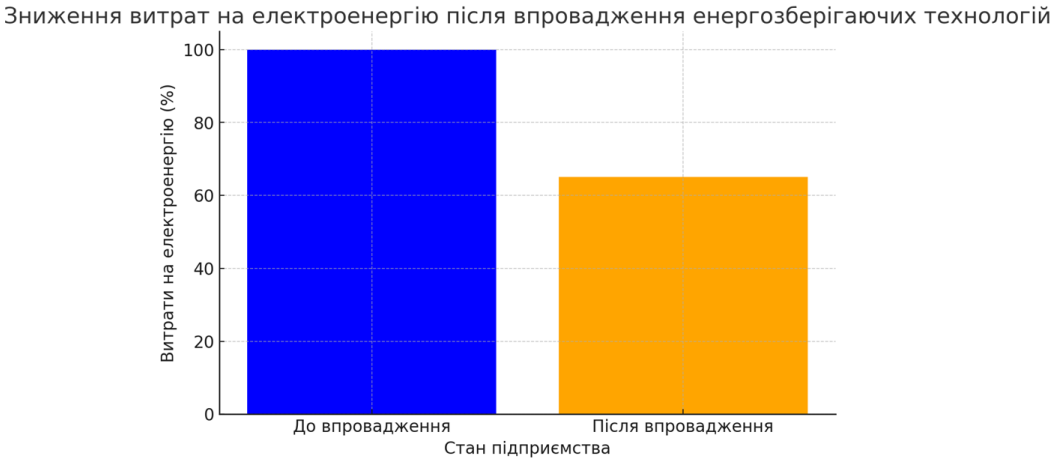


Рисунок 5 Порівняння витрат на електроенергію до та після впровадження енергозберігаючих технологій.

Результати досліджень підтверджують, що підприємства, які впроваджують комплексні заходи з енергоефективності, можуть знизити загальні витрати на електроенергію

на 25–35%, що позитивно впливає на їх фінансову стійкість та екологічну відповідальність [4-6].

Підвищення ефективності споживання електроенергії промисловими підприємствами є стратегічним напрямком у розвитку сучасної промисловості. Використання цифрових систем моніторингу, перехід на енергоефективне обладнання, впровадження відновлюваних джерел енергії та оптимізація процесів виробництва дозволяють досягти суттєвого скорочення витрат на електроенергію.

Подальші дослідження повинні бути спрямовані на вдосконалення методів енергетичного аналізу, розробку нових алгоритмів управління навантаженням та підвищення адаптивності промислових електромереж. Інтеграція штучного інтелекту та технологій Інтернету речей в управління енергоспоживанням відкриває нові можливості для підвищення ефективності та сталого розвитку промислового сектору.

Перелік посилань

1. https://energy365.com.ua/tpost/3au4lcuv91-visok-tsni-na-elektroenergyu-prichini-ta.
2. https://www.slovoidilo.ua/2020/05/19/infografika/ekonomika/pandemiyi-vartist-elektroenerhiyi-promyslovosti-yevropi-stala-deshevshe-nizh-ukrayini
3. https://www.slovoidilo.ua/2021/08/13/infografika/suspilstvo/taryfy-elektroenerhiyu-yak-zminyuvalasya-minimalna-czina-naselennya
4. Гаприндашвілі Б.В. Енергозбереження як чинник підвищення конкурентоспроможності промислових підприємств / Б.В. Гаприндашвілі // БізнесІнформ – 2014. – № 8. – С. 213–217.
5. Гашо Е.Г. Повышение энергоэффективности как двигатель модернизации промышленности / Е.Г. Гашо, М.В. Степанова [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5609.
6. Іпполітова І.Я. Формування організаційно-економічного механізму енергозбереження на підприємстві / І.Я. Іпполітова, К.С. Сорокотяженко // Глобальні та національні проблеми економіки. – 2015. – Вип. 8. – С. 406–411

УДК 621.311.21

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Д. Коломієць, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Д. Причиненко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ ТА АГРЕГАТІВ ГІДРОСТАНЦІЙ

Гідроелектростанції (ГЕС) є важливим джерелом відновлюваної енергії, що забезпечує стабільне електропостачання та сприяє зменшенню викидів парникових газів. Вдосконалення режимних та енергетичних показників систем і агрегатів ГЕС є одним із ключових напрямів підвищення ефективності роботи станцій. Оптимізація гідроагрегатів та вдосконалення режимів експлуатації дозволяють зменшити енергетичні втрати, підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) та подовжити термін служби обладнання [1].

Сучасні технології управління гідроелектростанціями включають використання автоматизованих систем контролю, прогнозування навантажень та застосування новітніх методів діагностики роботи гідроагрегатів. Дослідження в цій галузі дозволяють розробити нові стратегії експлуатації, які сприяють збільшенню виробітку електроенергії та зменшенню експлуатаційних витрат.

Оптимізація режимів роботи гідроагрегатів передбачає комплекс заходів, спрямованих на підвищення ефективності їхньої роботи. Впровадження автоматизованих систем контролю дозволяє оперативно регулювати навантаження, забезпечуючи максимальну продуктивність при мінімальних витратах ресурсів. Важливим аспектом є застосування цифрових технологій для прогнозування рівня води у водосховищах та оптимального розподілу навантажень між агрегатами.

Модернізація гідротурбін та генераторів сприяє покращенню їх технічних характеристик, зменшенню втрат енергії та збільшенню ККД. Використання новітніх матеріалів і технологій обробки робочих коліс турбін дозволяє підвищити їхню довговічність та ефективність. Дослідження свідчать, що впровадження інноваційних рішень у конструкцію гідроагрегатів може забезпечити зростання виробітку електроенергії на 5-10% [2].

Застосування систем управління навантаженням дозволяє уникнути надмірних перевантажень та нерівномірного розподілу потужності між агрегатами. Оптимальне регулювання водяного потоку забезпечує стабільну роботу станції, знижує знос обладнання та мінімізує втрати енергії. Використання прогнозних моделей дозволяє враховувати коливання рівня води та сезонні зміни навантаження, що сприяє підвищенню загальної ефективності ГЕС.

Розвиток методів діагностики та моніторингу стану гідроагрегатів забезпечує своєчасне виявлення несправностей та попередження аварійних ситуацій. Використання вібраційної діагностики, тепловізійного аналізу та систем моніторингу стану підшипників і лопаток дозволяє зменшити витрати на технічне обслуговування та продовжити термін експлуатації обладнання [3].

Згідно [2], вдосконалення режимів роботи гідроелектростанцій дозволяє зменшити втрати енергії на 10-15%, що значно підвищує їхню економічну ефективність. Використання цифрових технологій управління та прогнозування енергетичних потоків сприяє більш гнучкому реагуванню на зміну навантаження та забезпечує стабільну генерацію електроенергії [4].

Вдосконалення режимних та енергетичних показників систем і агрегатів гідроелектростанцій є одним із ключових напрямків підвищення ефективності їхньої роботи. Використання автоматизованих систем управління, модернізація гідротурбін та застосування методів прогнозування дозволяють зменшити втрати енергії, збільшити ККД обладнання та забезпечити надійну роботу станції. Подальші дослідження мають бути спрямовані на інтеграцію штучного інтелекту у процес управління гідроагрегатами, розробку нових методів діагностики та вдосконалення систем моніторингу стану обладнання. Реалізація сучасних технологічних рішень сприятиме сталому розвитку гідроенергетики та підвищенню її ефективності у майбутньому.

Перелік посилань

1. J. Qu, W. Shi, K. Luo, C. Feng and J. Mou, "Day-ahead Generation Scheduling Method for New Energy and Hydro Power System," *2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Guangzhou, China, 2018, pp. 1899-1902, doi: 10.1109/POWERCON.2018.8602031.

2. K. Pangao, W. Changli, L. Wenfeng, Z. Jianming, L. Chenkun and S. Junying, "Field test study on regulation performance of hydropower units bearing large-scale wind power fluctuations," *2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Beijing, China, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/EI2.2018.8581932.

3. Y. Tao, Q. Wang, Z. Yin, H. Zhang and K. Liao, "A Flexibility-Based Two-Stage Optimization Method for Day-Ahead and Intra-Day Scheduling of Coal- Hydro-Wind-Photovoltaic Multi-Energy Power System," *2023 2nd Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE)*, Chengdu, China, 2023, pp. 666-672, doi: 10.1109/ACFPE59335.2023.10455172.

4. S. E. Sati and M. Hayati, "The Economic Effect of the Sudanese-Egyptian Electric Grid Interconnection on the Operating Cost of the Sudanese Grid," *2020 International Conference on Computer, Control, Electrical, and Electronics Engineering (ICCCEEE)*, Khartoum, Sudan, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICCCEEE49695.2021.9429675

УДК 621.316.1

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
К. Рибка, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
С. Тимченко , аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ВАРІАНТНІ РОЗРАХУНКИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ ВВОДІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

Проектування розподільчих пристроїв вводів трансформаторних підстанцій є ключовим фактором у забезпеченні стабільної та надійної роботи електроенергетичних систем. Сучасні тенденції розвитку енергетичного сектору вимагають підвищення ефективності та зниження втрат електроенергії, що у свою чергу потребує глибокого аналізу та застосування оптимізаційних методів у проектуванні розподільчих пристроїв. Завданням таких пристроїв є забезпечення розподілу електроенергії між споживачами, зменшення втрат у мережі та забезпечення безпеки експлуатації електрообладнання. Оптимізація проектування дозволяє не лише скоротити витрати на будівництво та експлуатацію підстанцій, а й суттєво покращити їхні експлуатаційні характеристики. Вибір оптимальної схеми підключення, типу обладнання та параметрів комутаційної апаратури визначає, наскільки ефективно працюватиме електроенергетична система, наскільки вона буде стійкою до перевантажень і аварійних ситуацій [1-3].

Одним із ключових аспектів оптимізації є врахування економічної ефективності. У багатьох випадках обираються варіанти, які мають найменшу вартість початкових капіталовкладень, однак у довгостроковій перспективі такі рішення можуть виявитися невигідними через високі експлуатаційні витрати. Тому важливим критерієм оптимального проектування є не лише мінімізація початкових інвестицій, а й зниження довгострокових витрат на обслуговування та експлуатацію. Застосування сучасних методів аналізу дозволяє оцінити кілька варіантів розподільчих пристроїв та вибрати найбільш ефективний за економічними і технічними параметрами. Такі розрахунки враховують вартість обладнання, втрати електроенергії в комутаційних пристроях, тривалість терміну служби, надійність роботи системи та рівень її енергетичної ефективності.

Енергетична ефективність є ще одним важливим фактором оптимізації проектування розподільчих пристроїв. Використання сучасних матеріалів, нових технологій ізоляції та автоматизованих систем моніторингу дозволяє значно скоротити втрати енергії в мережі. Дослідження показують, що запровадження новітніх комутаційних пристроїв із мінімальними перехідними опорами дозволяє зменшити втрати енергії до 15%, а модернізація трансформаторного обладнання може дати додаткове зниження витрат електроенергії на 10–12%. Таким чином, комплексний підхід до проектування включає не тільки економічну доцільність, а й використання енергоефективних технологій для оптимізації роботи всієї системи.

Важливим етапом оптимізації є вибір оптимальних режимів роботи підстанцій і розподільчих пристроїв. Аналіз навантажень та прогнозування їхнього змінного характеру дозволяє встановити оптимальні параметри для трансформаторів і комутаційної апаратури. Неправильний вибір режиму роботи призводить до зниження енергоефективності, перевантаження окремих елементів мережі та збільшення витрат електроенергії. Варіантні розрахунки, що включають аналіз можливих схем підключення, допомагають визначити оптимальні режими експлуатації та забезпечити найбільш ефективне використання електроенергії.

Окремо варто зазначити вплив автоматизації та цифрових технологій на процес проектування та експлуатації розподільчих пристроїв. Використання інтелектуальних систем моніторингу дозволяє контролювати стан обладнання в режимі реального часу, автоматично аналізувати навантаження та виявляти потенційні проблеми ще до їхнього виникнення. Впровадження цифрових технологій, таких як SCADA-системи та Інтернет речей, забезпечує підвищення надійності експлуатації, оскільки дозволяє автоматично оптимізувати режими роботи підстанції. За допомогою аналізу великих даних можна передбачати аварійні ситуації, що дає можливість своєчасно реагувати на можливі збої в роботі електромережі [4-6].

Автоматизовані системи управління електроенергією також сприяють підвищенню ефективності роботи трансформаторних підстанцій. Наприклад, завдяки застосуванню адаптивних алгоритмів можна зменшити втрати потужності під час передачі електроенергії, розподіляючи навантаження таким чином, щоб уникати перевантажень окремих ділянок мережі. Це не лише знижує ймовірність аварій, але й підвищує стабільність електропостачання. Використання автоматизованих систем дозволяє скоротити витрати електроенергії на 10–20%, що у великих енергосистемах може означати значні економічні переваги.

Досвід впровадження оптимізованих рішень у проектуванні розподільчих пристроїв вводів трансформаторних підстанцій показує, що правильний підхід до проектування дозволяє не лише зменшити енергетичні втрати, а й підвищити надійність системи та знизити ризик аварій. Наприклад, впровадження комбінованих схем живлення, що дозволяють автоматично перемикати навантаження у разі виходу з ладу одного з елементів системи, значно підвищує безпеку експлуатації електроенергетичних об'єктів. Дослідження показують, що такі рішення дозволяють знизити кількість аварійних ситуацій на 30%, що особливо важливо для великих промислових підприємств та критичної інфраструктури.

Перспективні напрями розвитку включають подальше вдосконалення систем управління електромережею за допомогою штучного інтелекту та машинного навчання. Ці технології дозволяють прогнозувати можливі перевантаження та автоматично змінювати параметри роботи розподільчих пристроїв у режимі реального часу. Такий підхід забезпечує ще вищий рівень енергоефективності та стабільності електропостачання.

Таким чином, оптимізація проектування розподільчих пристроїв вводів трансформаторних підстанцій є багатофакторним завданням, що включає економічну, технічну та енергетичну складові. Використання варіантних розрахунків дозволяє обирати найбільш ефективні рішення, знижувати витрати та підвищувати надійність роботи системи. Автоматизація та цифрові технології відіграють ключову роль у сучасному проектуванні, надаючи можливість ефективного управління енергетичними потоками та підвищуючи стійкість електромереж. Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на розробку нових алгоритмів управління, впровадження інтелектуальних систем моніторингу та вдосконалення елементної бази трансформаторних підстанцій.

Перелік посилань

1. Кідиба В.П., Шелепеть Т.М. Захист трансформаторів та авторансформаторів: Навч. посібник. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 180 с. ISBN 966-553-425-4
2. Проектування електричних мереж напругою 0,4- 110 кВ: ГІД 34.20.178.2005: затв. М-вом Палива та енергетики України 08.04.05: Надано чинності 479 з 01.06.2005-К.: ОЕП „ГРІФТЕ”,2005-43 с.
3. ДСТУ 3429-96 Електрична частина електростанцій та електричної мережі. Терміни та визначення.
4. ДСТУ 2790-94 Системи електропостачальні номінальною напругою понад 1000 В: джерела, мережі, перетворювачі та споживачі електричної енергії. Терміни та визначення.
5. ДСТУ 2791-94 Системи електропостачальні номінальною напругою до 1000 В: джерела, мережі, перетворювачі та споживачі електричної енергії. Терміни та визначення.
6. ДСТУ 1.0-93. Державна система стандартизації України. Загальні положення.

УДК 620.9

Р. Єсін , аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
І. Стрєлєнко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ЗА РАХУНОК УТИЛІЗАЦІЇ ОБОРОТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВОД

Енергоефективність промислових підприємств є одним із ключових чинників забезпечення їхньої конкурентоспроможності та раціонального використання енергетичних ресурсів. Зменшення витрат на водопостачання та енергоспоживання можливе завдяки впровадженню технологій утилізації оборотних технологічних вод. Використання сучасних методів переробки та повторного застосування води сприяє не лише економічній вигоді, а й екологічній безпеці підприємства.

За даними Міжнародного енергетичного агентства, впровадження технологій утилізації води може знизити загальне споживання енергії промисловими підприємствами на 10-15%. Крім того, використання повторно очищеної води дозволяє скоротити обсяг промислових скидів до 40%, що позитивно впливає на екологічний стан довкілля [1].

Оборотні технологічні води відіграють важливу роль у промислових процесах, оскільки використовуються для охолодження, миття обладнання, підготовки сировини та інших виробничих потреб. Раціональне управління водними ресурсами ґрунтується на використанні систем рециркуляції, які дозволяють багаторазово використовувати воду без необхідності її скиду у навколишнє середовище. Це дає змогу значно скоротити витрати на водозабезпечення та очищення стічних вод, зменшуючи екологічний вплив підприємства.

Утилізація теплової енергії оборотних вод є одним із ключових напрямків підвищення енергоефективності виробництва. Використання теплообмінників та рекуператорів дає змогу повертати теплову енергію у виробничий процес, скорочуючи витрати на підігрів технологічних рідин та опалення промислових приміщень. Статистичні дані показують, що використання рекупераційних систем дозволяє зменшити витрати енергії до 25%, а термін окупності таких проектів складає від 3 до 5 років.

Застосування сучасних методів очищення технологічних вод відіграє важливу роль у забезпеченні їх придатності для повторного використання. Використання ультрафільтрації, зворотного осмосу, електродіалізу та інших методів глибокого очищення дозволяє видаляти забруднюючі речовини, зменшуючи навантаження на природні водні ресурси. Дослідження, проведені Європейською комісією з питань сталого розвитку, свідчать, що підприємства, які застосовують сучасні методи очищення, можуть знизити витрати на водоспоживання на 30-50% [2].

Впровадження ефективних методів управління водоспоживанням є ще одним важливим аспектом оптимізації енерговитрат підприємства. Використання інтелектуальних систем регулювання подачі води дозволяє адаптувати витрати ресурсу до реальних потреб виробництва, запобігаючи його надмірному споживанню. Автоматизація процесів дозволяє забезпечити оптимальне використання оборотних вод, запроваджуючи механізми мінімізації втрат і підвищуючи загальну ефективність роботи підприємства.

Економічний аналіз впровадження систем утилізації оборотних технологічних вод свідчить про значне зменшення операційних витрат підприємств. Зниження вартості водопостачання та очищення стічних вод дозволяє скоротити загальні витрати на 15-20%. Використання рециркуляційних систем сприяє скороченню споживання прісної води, що є особливо важливим у регіонах із дефіцитом водних ресурсів. Крім того, зменшення обсягів стічних вод сприяє зниженню екологічного навантаження на природні водні басейни. За

оцінками Світового банку, підприємства, які реалізують стратегії повторного використання води, можуть скоротити свої операційні витрати на утилізацію відходів на 20-35% [3].

Утилізація оборотних технологічних вод є одним із найбільш ефективних шляхів підвищення енергоефективності промислового підприємства. Використання рециркуляційних систем, утилізація теплової енергії води та застосування передових методів очищення сприяють зниженню споживання енергоресурсів, оптимізації витрат та підвищенню екологічної безпеки підприємства. Інтеграція автоматизованих систем контролю водокористування дозволяє забезпечити стабільну якість оборотних вод та адаптувати їхні параметри до потреб виробництва.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку нових методів інтеграції енергозберігаючих технологій у виробничі процеси та вдосконалення механізмів моніторингу ефективності використання водних ресурсів. Застосування сучасних цифрових технологій у цій сфері дозволить забезпечити більш точне регулювання витрат, підвищити рівень автоматизації управління та створити комплексні рішення для зниження екологічного навантаження промислових підприємств. Досвід країн Європейського Союзу демонструє, що комплексне впровадження енергоефективних рішень у сфері водокористування дозволяє досягти економії до 25% у загальному енергоспоживанні промислового виробництва.

Перелік посилань

1. Kazakov V.G., Gromova E.N. Closed cycle of air-steam mixture the drying section of paper machine // Power engineering: research, equipment, technology. 2019. №3. pp. 24-31.

2. Plotnikova, L.V., Chilikova I.I., Sitnikov, S.Y., Efremov, G.I. Systematic approach to the assessment of energy complex efficiency for thermal energy production with heat power saving transformer turning on // International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. 8 (4). pp. 26727-26737.

3. Plotnikova L.V., Efremov G.I., Sitnikov S.Y., Chilikova I.I. Energyresource-saving system «distillation unit – heat pump» for industrial separation of 140 substances / 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602494.

УДК 537.84

В. Таратута, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
В. Абузяров, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ НАГРІВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОНТРОЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

Сучасна промисловість змушена шукати нові рішення для підвищення ефективності енергоспоживання, оскільки витрати на паливо та електроенергію постійно зростають. У різних галузях, таких як металургія, скляне виробництво, кераміка та машинобудування, нагрівальні печі споживають значну частину загальної енергії. Проте, попри їхню важливість, більшість таких установок працюють неефективно, через що значна частина тепла просто втрачається. Це призводить не лише до економічних збитків, але й до зайвих викидів шкідливих речовин у атмосферу.

Традиційні методи підвищення ефективності, такі як покращена теплоізоляція, модернізація пальникових систем та впровадження рекуператорів, дозволяють скоротити втрати, але не завжди забезпечують очікуваний результат. В останні роки все більше уваги привертає новий метод — використання контрольованих електричних полів. Його суть полягає в тому, що електричне поле може змінювати рух гарячих газів усередині печі, рівномірно розподіляти тепло і зменшувати втрати енергії [1].

У промислових печах одна з головних проблем полягає в тому, що температура розподіляється нерівномірно. Деякі ділянки перегріваються, а інші, навпаки, отримують недостатньо тепла. Це негативно позначається на якості продукції, особливо у процесах термічної обробки металів чи випалу кераміки. Використання електричних полів дозволяє змінювати напрямок потоків гарячих газів, тим самим покращуючи розподіл температури. У результаті оброблюваний матеріал отримує необхідну кількість тепла, а витрати енергії значно знижуються.

Дослідження показують, що застосування контрольованих електричних полів може зменшити витрати палива на 5–10%, а іноді навіть більше. Це означає, що промислові підприємства можуть суттєво знизити свої витрати на енергоносії без необхідності повної реконструкції печей. Такий метод не потребує великих капіталовкладень, оскільки для його реалізації достатньо встановити систему електродів і відповідне керуюче обладнання [2].

Окрім економічних переваг, ця технологія також допомагає зменшити вплив промисловості на навколишнє середовище. Більш ефективне використання тепла означає менші викиди парникових газів і забруднювальних речовин. Це особливо важливо в умовах сучасних екологічних стандартів, які змушують підприємства впроваджувати заходи для скорочення свого вуглецевого сліду.

Практичне застосування контрольованих електричних полів у печах уже показало свою ефективність у різних галузях промисловості. Їх можна використовувати як у газових, так і в електричних печах, а також у комбінованих системах. Гнучкість цієї технології дозволяє легко адаптувати її до потреб конкретного виробництва [3].

У майбутньому цей підхід може бути ще більш ефективним завдяки впровадженню інтелектуальних систем керування. Використання штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання дозволить автоматично регулювати параметри електричного поля в реальному часі, реагуючи на зміну робочих умов. Це відкриває нові можливості для подальшого підвищення енергоефективності та економії ресурсів.

Сьогодні підприємства, які прагнуть зменшити витрати та підвищити продуктивність, уже можуть звернути увагу на цю технологію. Вона не тільки допомагає скоротити витрати

енергії, але й сприяє більш екологічно чистому виробництву. Використання контрольованих електричних полів у промислових печах стає важливим кроком до більш ефективного та сталого виробництва в умовах сучасних викликів

Перелік посилань

1. Cheilytko Andrii, Yerofieieva Alina. Increasing the uniformity of metal heating in chamber furnaces by influence of the electric field. II "Environmental Innovations: Advances in Engineering, Technology and Management EIAETM Conference", On-line Conference, 19 - 23 October 2020. С. 97 - 94.

2. Yerofieieva A.A, Artemchuk V.V. Improving the Efficiency of Chamber Furnaces Through the Use of Controlled Electric Fields «Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування»: тези доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції, 25 – 26 листопада 2020 р. Харків: НТУ «ХПІ»: Видавництво «Лідер», 2020. С. 85 - 87.

3. Качан Ю.Г., Коваленко В. Л., Візер А. А. Методика визначення оптимальних енергетичних параметрів термічної печі, що працює на біогазі, за умови наявності в її камері просторового електричного поля. Металургія: наукові праці ЗДІА. Запоріжжя: РВВ ЗДІА, 2016. № 35. С. 88 - 91.

УДК 621.311

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
К. Ткаченко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
С. Тимченко , аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

Розосереджена генерація відіграє все більш важливу роль у сучасних енергетичних системах, дозволяючи підвищити гнучкість та стійкість електромереж. Вона включає в себе відновлювані джерела енергії, такі як сонячні та вітрові електростанції, що працюють у децентралізованому режимі. Однак нестабільність таких джерел енергії вимагає використання накопичувачів енергії для балансування виробництва і споживання. Ефективне управління взаємодією між елементами розосередженої генерації та накопичувачами енергії дозволяє підвищити загальну ефективність енергетичних систем та забезпечити стабільність електропостачання [1].

Розосереджена генерація включає автономні та мікромережеві енергосистеми, що працюють у взаємодії з централізованими мережами або незалежно від них. Інтеграція накопичувачів енергії дозволяє згладжувати коливання потужності та забезпечувати резервну генерацію. Відновлювані джерела енергії забезпечують генерацію електроенергії з екологічно чистих ресурсів. Вітрові та сонячні електростанції характеризуються змінним рівнем виробітку, що вимагає застосування ефективних стратегій балансування та резервування енергії.

Накопичувачі енергії відіграють ключову роль у забезпеченні стабільності розосереджених систем. Використання акумуляторних батарей, суперконденсаторів та гібридних систем дозволяє акумулювати надлишкову енергію та компенсувати її дефіцит у періоди пікового навантаження. Завдяки сучасним технологіям зберігання енергії можна зменшити залежність від коливань генерації та оптимізувати роботу всієї системи.

Системи управління енергією забезпечують координацію роботи генераторів та накопичувачів для досягнення максимальної ефективності. Вони використовують алгоритми прогнозування споживання та генерації електроенергії, враховуючи погодні умови, зміну навантаження та стан акумуляторних батарей. Оптимізація енергетичних потоків дозволяє знизити втрати енергії та підвищити економічну ефективність експлуатації розосереджених джерел живлення [2,3].

Ефективне керування включає розробку стратегій інтеграції накопичувачів енергії для мінімізації впливу нестабільності генерації. Алгоритми керування мають забезпечувати раціональний розподіл ресурсів, адаптивне регулювання та гнучке реагування на зміну умов роботи енергосистеми. Інноваційні методи управління передбачають застосування систем штучного інтелекту для прогнозування споживання та динамічного коригування енергетичних потоків.

Для оцінки взаємодії між генерацією та накопичувачами використовуються чисельні моделі та експериментальні випробування. Основні дослідження зосереджені на визначенні оптимальних параметрів зарядки та розрядки накопичувачів, аналізі впливу коливань генерації на стабільність мережі, використанні алгоритмів прогнозування попиту та пропозиції енергії, а також розробці адаптивних стратегій керування енергетичними потоками.

Експериментальні випробування демонструють, що ефективне управління накопичувачами енергії дозволяє знизити навантаження на мережу, покращити якість електроенергії та підвищити загальну ефективність роботи розосереджених джерел генерації. Аналіз отриманих даних дозволяє створювати оптимізовані моделі енергетичних систем та прогнозувати їхню ефективність у різних сценаріях роботи.

Дослідження взаємодії між елементами системи розосередженої генерації та накопичувачами енергії є важливим напрямком для забезпечення стабільної та ефективної роботи електроенергетичних систем. Використання накопичувачів дозволяє зменшити коливання потужності, покращити якість електроенергії та підвищити надійність мережі. Інтеграція накопичувачів із системами керування енергетичними потоками забезпечує оптимальну балансування генерації та споживання, що є ключовим аспектом сталого розвитку енергетичних технологій [4,5].

Подальші дослідження у цій сфері повинні бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів управління, розробку нових типів накопичувачів, підвищення ефективності акумуляторних технологій та інтеграцію інтелектуальних рішень для динамічного прогнозування та адаптивного керування енергетичними потоками. Використання великих даних та методів машинного навчання дозволить досягти нового рівня оптимізації роботи енергетичних систем, забезпечуючи їхню гнучкість, ефективність та екологічну безпеку.

Перелік посилань

1. Cho H, Smith AD, Mago P. Combined cooling, heating and power: a review of performance improvement and optimization. Appl Energy 2014;136:168–85.

2. Krajacic G, Duic N, Zmijarevic Z, Mathiesen BV, Vucinic AA, da Graca Carvalho M. Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO2 emissions reduction. Appl Therm Eng. 31:2073.

3. Colmenar-Santos A, Reino-Rio C, Borge-Diez D, Collado-Fernández E. Distributed generation: a review of factors that can contribute most to achieve a scenario of DG units embedded in the new distribution networks. Renew Sustain Energy Rev 2016;59:1130–48.

4. Caresana F, Pelagalli L, Comodi G, Renzi M. Microturbogas cogeneration systems for distributed generation: effects of ambient temperature on global performance and components' behavior. Appl Energy 2014;124:17–27.

5. Viral R, Khatod DK. Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: a review. Renew Sustain Energy Rev 2012;16:5146–65

УДК 620.9

І. Коваленко, старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
К. Ткаченко, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

BADANIA NAD EFEKTYWNOŚCIĄ SYSTEMÓW INTELIGENTNYCH Z ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII

Współczesny rozwój technologii energetycznych koncentruje się na integracji odnawialnych źródeł energii (OZE) z inteligentnymi systemami zarządzania zużyciem energii. Wykorzystanie inteligentnych systemów energetycznych pozwala zwiększyć efektywność wykorzystania energii, zoptymalizować równowagę między wytwarzaniem a zużyciem oraz zmniejszyć wpływ na środowisko. Smart-systems z OZE łączą odnawialne źródła energii, w tym energetykę słoneczną i wiatrową, z automatycznymi algorytmami sterowania i prognozowania.

Światowe badania potwierdzają, że integracja technologii Smart z odnawialnymi źródłami energii pozwala zwiększyć efektywność produkcji energii elektrycznej o 15–20%, zmniejszyć straty w sieciach elektroenergetycznych oraz zapewnić stabilne działanie systemów nawet w zmiennych warunkach pogodowych. Według Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA), do 2030 roku wdrożenie systemów Smart może zredukować emisję CO_2 w globalnej energetyce o 25%. W ramach niniejszego badania analizowane są kluczowe zasady funkcjonowania inteligentnych systemów, ich wpływ na ogólną efektywność energetyczną oraz potencjalne perspektywy rozwoju [1].

Wdrożenie systemów Smart w sektorze odnawialnej energii opiera się na wykorzystaniu zaawansowanych technologii automatyzacji i cyfrowej analizy danych. Inteligentne systemy sterowania pozwalają nie tylko monitorować produkcję i zużycie energii, ale także dostosowywać tryby pracy do zmieniających się warunków zewnętrznych.

Optymalizacja bilansowania obciążeń jest jedną z kluczowych zalet systemów Smart. Wykorzystanie sztucznej inteligencji oraz algorytmów uczenia maszynowego umożliwia przewidywanie zmian poziomu generacji OZE i regulowanie podaży energii do sieci zgodnie z aktualnymi potrzebami odbiorców. Według badań Komisji Europejskiej zastosowanie algorytmów prognozowania w połączeniu z technologiami Smart Grid pozwala zmniejszyć straty energii w sieciach elektroenergetycznych o 12–18% [2].

Integracja systemów magazynowania energii, takich jak baterie akumulatorowe i superkondensatory, pozwala kompensować wahania w produkcji energii elektrycznej. Światowa praktyka pokazuje, że wykorzystanie takich systemów w połączeniu z OZE pozwala zwiększyć udział odnawialnej energii w całkowitym bilansie zużycia energii o 30%.

Zastosowanie rozproszonych systemów energetycznych w połączeniu z technologiami Smart Grid przyczynia się do zwiększenia efektywności sieci energetycznych. Dzięki zastosowaniu inteligentnych liczników, cyfrowych stacji transformatorowych oraz zautomatyzowanej kontroli przepływu energii osiąga się optymalizację obciążenia sieci, minimalizuje się straty energii i zwiększa ogólną niezawodność dostaw energii elektrycznej. Według BloombergNEF, wdrożenie takich systemów w krajach rozwiniętych pozwoliło zmniejszyć liczbę przerw w dostawie energii elektrycznej o 40% w porównaniu do tradycyjnych systemów [3].

Udane przykłady wdrożenia inteligentnych systemów z OZE można zaobserwować w krajach Unii Europejskiej, gdzie technologie prognozowania produkcji energii elektrycznej na podstawie big data i sztucznej inteligencji pozwalają znacznie poprawić integrację odnawialnych źródeł energii w ogólny system energetyczny. Według Międzynarodowej Agencji Energetycznej dalszy rozwój tych technologii może zmniejszyć zużycie paliw kopalnych w światowej energetyce o 30% do 2050 roku. W Niemczech, na przykład, programy cyfrowego zarządzania odnawialnymi źródłami energii

pozwoliły zwiększyć efektywność wykorzystania elektrowni słonecznych o 22% w ciągu ostatnich pięciu lat.

Według analitycznej firmy Wood Mackenzie globalne inwestycje w inteligentne systemy OZE do 2040 roku przekroczą 1,3 biliona dolarów, co świadczy o znacznym potencjale ich rozwoju. Zwiększenie efektywności energetycznej poprzez wykorzystanie systemów Smart przyczyni się do przejścia na bardziej zrównoważoną i ekologiczną energetykę.

Badania nad efektywnością systemów Smart z odnawialnymi źródłami energii potwierdzają ich zdolność do znaczącego zwiększania poziomu efektywności energetycznej oraz stabilności sieci elektroenergetycznych. Wykorzystanie nowoczesnych technologii automatyzacji, prognozowania zapotrzebowania i integracji systemów magazynowania energii pozwala tworzyć bardziej adaptacyjne i odporne na czynniki zewnętrzne kompleksy energetyczne.

Światowe doświadczenie pokazuje, że zastosowanie inteligentnych algorytmów sterowania i cyfrowych rozwiązań Smart Grid pozwala zmniejszyć straty energii elektrycznej, zwiększyć efektywność pracy OZE oraz ograniczyć zależność od paliw kopalnych. Dalsze badania powinny koncentrować się na doskonaleniu algorytmów prognozowania, optymalizacji zarządzania rozproszonymi systemami energetycznymi oraz rozszerzeniu możliwości integracji sztucznej inteligencji w zarządzanie sieciami energetycznymi.

Biorąc pod uwagę globalne trendy w sektorze energii odnawialnej, rozwój systemów Smart stanie się istotnym krokiem w kierunku osiągnięcia stabilności energetycznej i bezpieczeństwa ekologicznego w przyszłości. Wdrożenie nowoczesnych technologii cyfrowych w połączeniu z innowacyjnymi metodami zarządzania pozwoli na efektywne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii oraz zapewni zrównoważony rozwój sieci energetycznych w długoterminowej perspektywie.

Lista linków

1. T. Atasoy, H. E. Akınç and Ö. Erçin, "An analysis on smart grid applications and grid integration of renewable energy systems in smart cities," *2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Palermo, Italy, 2015, pp. 547-550, doi: 10.1109/ICRERA.2015.7418473.

2. M. Cakir, I. Cankaya, I. Garip and I. Colak, "Advantages of Using Renewable Energy Sources in Smart Grids," *2022 10th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, Istanbul, Turkey, 2022, pp. 436-439, doi: 10.1109/icSmartGrid55722.2022.9848612.

3. A. M. Mohammad, O. A. Alghamdi, A. A. Alhusssainy, M. Rawa, A. M. Abusorrah and Y. A. Al-Turki, "Optimal Economic Dispatch of Power System Networks with Renewable Energy Sources," *2023 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies - Middle East (ISGT Middle East)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/ISGTMiddleEast56437.2023.10078642.

УДК 620.92

В. Кутик, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
О. Тюнін, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет
Віктор Коваленко, д.т.н., проф. кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем
Запорізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА БАЗІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ

Сучасний розвиток енергетичних технологій спрямований на пошук ефективних та екологічно чистих методів генерації електроенергії. Одним із найбільш перспективних напрямів є створення комбінованих систем енергозабезпечення на базі відновлюваних джерел енергії, які забезпечують стабільність постачання електроенергії, зменшують навантаження на централізовані електромережі та сприяють декарбонізації енергетичного сектора. Використання таких систем дозволяє поєднувати переваги різних типів генерації, таких як сонячна, вітрова, гідроенергетика, біогазові установки та геотермальні станції. Однак ефективне використання цих технологій вимагає детального аналізу варіантів інтеграції, оптимізації режимів роботи, впровадження систем накопичення та розподілу електроенергії [1].

Ключовим аспектом розробки комбінованих систем енергозабезпечення є їхня здатність збалансовано розподіляти потоки енергії, враховуючи змінний характер генерації відновлюваних джерел. Сонячні та вітрові електростанції виробляють енергію нерівномірно, залежно від погодних умов, що може спричиняти проблеми із забезпеченням безперервного електропостачання. Одним із найефективніших рішень цієї проблеми є інтеграція систем накопичення енергії, таких як літій-іонні акумулятори, гідроакумулюючі станції, системи перетворення електроенергії у водень або накопичення енергії у формі стисненого повітря. Використання таких технологій дозволяє компенсувати нерівномірність вироблення енергії та забезпечити стабільну подачу в мережу [2].

Значну роль у підвищенні ефективності комбінованих енергетичних систем відіграє впровадження інтелектуальних систем управління, що базуються на технологіях штучного інтелекту та великих даних. Використання таких систем дозволяє прогнозувати рівень генерації електроенергії на основі метеорологічних даних, аналізувати споживання в режимі реального часу та адаптивно змінювати режими роботи генераторів і накопичувачів. Завдяки алгоритмам машинного навчання можна створювати гнучкі системи енергозабезпечення, що максимально ефективно використовують доступні ресурси та зменшують втрати при розподілі енергії.

Важливим напрямком розвитку комбінованих систем енергозабезпечення є впровадження технологій Smart Grid, які забезпечують взаємодію між генераторами, споживачами та системами зберігання енергії. Використання розумних мереж дозволяє оптимізувати потоки електроенергії та забезпечувати динамічне балансування між виробництвом і споживанням. Наприклад, у пікові години споживання система може автоматично спрямовувати енергію з накопичувачів, знижуючи навантаження на центральні мережі, а у періоди низького споживання – акумулювати надлишкову електроенергію. Це дозволяє значно підвищити ефективність використання відновлюваної енергії, знизити навантаження на основні електростанції та зменшити втрати в мережі.

Ще одним важливим аспектом комбінованих енергетичних систем є їхній вплив на екологічну ситуацію та рівень викидів парникових газів. Використання викопного палива для виробництва електроенергії є основним фактором забруднення атмосфери, тому перехід на відновлювані джерела є критично важливим для глобального зменшення викидів CO_2. За оцінками Міжнародного енергетичного агентства (IEA), повна інтеграція відновлюваних

джерел у світову енергосистему дозволить скоротити викиди вуглекислого газу на 50% до 2050 року. Використання комбінованих систем у промислових та побутових секторах дозволяє не лише знизити екологічний вплив, а й створює додаткові економічні переваги за рахунок зменшення витрат на електроенергію [3-4].

Фінансова доцільність впровадження комбінованих систем енергозабезпечення також відіграє важливу роль у їхньому масштабному застосуванні. Незважаючи на високі початкові інвестиції, такі системи дозволяють значно скоротити експлуатаційні витрати в довгостроковій перспективі. Наприклад, встановлення сонячних панелей у поєднанні з акумуляторними системами може скоротити витрати на електроенергію для підприємств на 30–50%, що робить такі рішення економічно привабливими. Крім того, розвиток технологій та масове виробництво обладнання сприяє поступовому зниженню вартості компонентів, що робить комбіновані системи енергозабезпечення дедалі доступнішими [5].

З точки зору перспектив розвитку комбінованих систем енергозабезпечення, важливу роль відіграє подальше вдосконалення технологій накопичення енергії. На сьогодні одним із найперспективніших напрямів є використання водневих технологій, що дозволяють зберігати енергію у вигляді водню та використовувати її у паливних елементах. Це відкриває нові можливості для інтеграції відновлюваної енергетики в транспортну сферу, де електрифікація залишається ключовим викликом. Також значний потенціал має розробка нових матеріалів для акумуляторів, що забезпечуватимуть вищу ємність, швидкість зарядки та довговічність.

Отже, комбіновані системи енергозабезпечення на базі відновлюваних джерел енергії є ключовим елементом сучасної енергетичної стратегії, спрямованої на підвищення ефективності та екологічності виробництва електроенергії. Використання інтегрованих підходів, що включають розподілену генерацію, системи накопичення та розумне управління потоками енергії, дозволяє створювати більш стійкі та незалежні енергосистеми. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення методів оптимізації балансування енергоспоживання, розробку більш ефективних алгоритмів керування та підвищення економічної ефективності інтегрованих енергетичних комплексів. Використання сучасних технологій у цій сфері дозволить значно скоротити витрати на електроенергію, підвищити енергетичну безпеку та знизити вплив на довкілля, що є критично важливим у контексті глобального переходу до сталого розвитку.

Перелік посилань

1. Kuznietsov, M., Lysenko, O., & Melnyk, O. (2019). OPTIMIZATION TASKS OF THE COMBINED ENERGY SYSTEMS BY ECONOMIC INDICATORS. Vidnovluvana Energetika , (4(59), 6-14. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.4(59).6-14

2. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.

3. Кузнєцов М. П. Деякі особливості автономної роботи вітрової та сонячної електростанцій. Відновлювана енергетика. 2016. №2. С.15-21.

4. Василенко В. І. Формування оптимальної структури локальної електроенергетичної системи на основі оцінки міри близькості розміщення об’єктів. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2017. №1. С.36-46.

5. Кузнєцов М. П., Ужейко С. О. Імовірнісні аспекти використання відновлювальних джерел енергії в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Відновлювана енергетика. 2016. №3. С.6-12.

ЗМІСТ

В. Рева, Ю. Папаїка 3
МОНІТОРИНГ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КОСМІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Р. Шлапко, В. Бородай 5
МОДИФІКОВАНИЙ СПОСІБ ЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРИВОДУ СИСТЕМ ПІДКАЧКИ-ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ ВОДИ

Є. Григор'єв, О. Азюковський 7
ОБГРУНТУВАННЯ НЕОБХІДНОСТІ ЗАПОБІГАННЮ ПРОТІКАННЯ СТРУМІВ ВИРІВНЯННЯ НА ДІЛЯНЦІ ПІДЗЕМНОГО МЕТАЛЕВОГО ТРУБОПРОВОДУ ЩО ПІД'ЄДНАНИЙ ДО ДВОХ СУМІЖНИХ СТАНЦІЙ КАТОДНОГО ЗАХИСТУ

О. Верьовкін 9
ФІЛЬТРИ АКТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В. Піліпенко 11
ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ ЯК ФАКТОР ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖАХ

О. Ровенський 13
КОНТРОЛЬ ТА ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Leonid Shevchuk 15
ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF RAILWAY LONGITUDINAL POWER LINES AT ELEVATED VOLTAGE LEVELS

П. Циган, О. Погорілий, Б. Макарчук, І. Ретівов, Д. Жужома 17
ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ ВДЕ В ПОТУЖНИХ ВУЗЛАХ НАВАНТАЖЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

В. Піліпенко 20
СТАНДАРТИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ: ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ (IEC 61000, EN 50160, IEEE 519)

М. Луценко, А. Кошеленко, О. Запишний, Г. Власенко, Ю. Смирнов, О. Замкова 22
ОСНОВНІ АСПЕКТИ СТВОРЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУР СИСТЕМ ЕЛЕКТРОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МУНІЦИПАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

В. Піліпенко 25
ПРИЧИНИ ТА НАСЛІДКИ ПРОСАДОК НАПРУГИ В ПРОМИСЛОВИХ МЕРЕЖАХ

О. Верьовкін 27
ВПЛИВ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

А. Атабаєв, В. Хоменко 29
СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ В КОМБІНОВАНОМУ ВИРОБНИЦТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЗА РАХУНОК ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

В. Піліпенко 31
ІДЕНТИФІКАЦІЯ ДЖЕРЕЛ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ І СПОТВОРЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОБ'ЄКТІ СПОЖИВАЧА

М. Щур, С. Форись, В. Перерва 33
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВІ ШАХТНОГО МЕТАНУ ТА ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

В. Васецький 35
ЕНЕРГОЄМНІСТЬ МЕТАЛУРГІЇ: ГЛОБАЛЬНИЙ І НАЦІОНАЛЬНИЙ КОНТЕКСТ

Я. Ярошенко, Д. Ципленков 37
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ВОДНЕВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ

О. Верьовкін 40
РОЛЬ СТАБІЛІЗАТОРІВ НАПРУГИ ТА КОМПЕНСАТОРІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ПРОМИСЛОВОСТІ

О. Ровенський 42
ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Н. Самоволик, О. Бобров 45
ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ ВЕС

В. Васецький 47
ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА СТРУКТУРА ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ

В. Піліпенко 49
МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТА МОНІТОРИНГУ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

A. Kolb, I. Morozov 51
PROSPECTS OF HYBRID ACTIVE POWER FILTERS IN SYSTEMS FOR IMPROVING ELECTRIC POWER QUALITY

В. Васецький 53
ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД

О. Верьовкін 55
ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПІДПРИЄМСТВАХ: КЕЙС-СТАДІ

В. Васецький 57
ЗАГАЛЬНІ ЗАСАДИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

О. Ровенський 59
КОМПЕНСАЦІЯ ПРОВАЛІВ І ПЕРЕРВ ЖИВЛЕННЯ

В. Васецький 61
ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В МЕТАЛУРГІЙНІЙ ГАЛУЗІ

О. Ровенський 63
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА СТОРОНІ СПОЖИВАЧІВ

В. Піліпенко 65
РОЛЬ ВИЩИХ ГАРМОНІК У ФОРМУВАННІ «ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ЗАБРУДНЕННЯ» ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖ

Л. Шевчук 67
ГЕНЕРАЦІЯ ТА РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ГАРМОНІЧНИХ СКЛАДОВИХ У ПРОМИСЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ

О. Верьовкін 69
АКТИВНІ ФІЛЬТРИ ГАРМОНІК ВИЩИХ ЧАСТОТ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Я. Яланський, В. Бріженюк, Є. Кривенко 71
ЕНЕРГЕТИЧНА ТА ТЕХНОЛОГІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІБРАЦІЙНИХ МАШИН МАЛОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ З ПРЯМИМ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ

В. Піліпенко 74
ПРОБЛЕМАТИКА ВИЩИХ ГАРМОНІК В ЕНЕРГОПОСТАЧАННІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ’ЄКТІВ

Л. Шевчук 76
ПРОБЛЕМИ ПЕРЕНАВАНТАЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ ПІД ДІЄЮ ВИЩИХ ГАРМОНІК

О. Верьовкін 78
ВПЛИВ НЕРІВНОМІРНОСТІ НАВАНТАЖЕННЯ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

О. Ткаленко, Д. Ципленков 80
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В СИСТЕМАХ ОПАЛЕННЯ

О. Ровенський 83
УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В РОЗПОДІЛЕНИХ СИСТЕМАХ

О. Верьовкін 85
АНАЛІЗ КОРОТКОЧАСНИХ ПЕРЕРВ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ

І. Коваленко, А. Карнаух, В. Абузяров, В. Коваленко 87
АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕРЕГУЛЬОВАНИХ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В УМОВАХ НЕСТАБІЛЬНОЇ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

І. Коваленко, С. Тимченко, В. Гридасов, В. Коваленко 89
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ СТРУМОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

І. Коваленко, С. Сіверський, Є. Гурін, В. Коваленко, 91
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ ПРИ ЗМІНІ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

І. Коваленко, Р. Діденко, В. Абузяров, В. Коваленко 93
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОЛІВ РІЗНОГО РОДУ НА ІНТЕНСИФІКАЦІЮ ТЕПЛООБМІНУ В ПІЧНОМУ ПРОСТОРІ

І. Коваленко, Р. Єсін, І. Стрєлєнко, В. Коваленко 95
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МАШИН ТА АГРЕГАТІВ ГІДРОСТАНЦІЙ ВЕЛИКОЇ ПОТУЖНОСТІ

І. Коваленко, А. Карнаух, В. Абузяров, В. Коваленко 97
ANALYSIS OF THE IMPACT OF LOW-QUALITY ELECTRICITY ON INDUSTRIAL ENERGY SYSTEMS AND ECONOMIC EFFICIENCY

І. Коваленко, Д. Климчук, В. Абузяров, Віктор Коваленко 99
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ СИСТЕМ НЕРЕГУЛЬОВАНОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА, ЩО ПРАЦЮЄ В УМОВАХ НЕЯКІСНОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

І. Коваленко, Д. Коломієць, Д. Причиненко, В. Коваленко 101
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ОТРИМАННЯ ТА ВИКОРИСТАННЯ ЗВАЛИЩНОГО БІОГАЗУ

І. Коваленко, В. Гридасов, А. Колосок, В. Коваленко 103
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА НАДІЙНОСТІ КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ В УМОВАХ СТРУМОВИХ ПЕРЕВАНТАЖЕНЬ

С. Куліков, Д. Устименко 106
ІННОВАЦІЙНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЗНОШУВАННЯ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ КОНТАКТІВ

С. Куліков, Д. Устименко 108
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ЗНОШУВАННЯ СТРУМОЗНІМАЛЬНИХ КОНТАКТІВ

С. Куліков, Д. Устименко 110
ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ВИПРОБУВАНЬ СИЛЬНОСТРУМОВОГО КОНТАКТУ В УКРАЇНІ

І. Коваленко, В. Кутик, С. Тимченко, В. Коваленко 112
УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗОВИХ СУМІШЕЙ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

І. Мостовенко, В. Коваленко 114
ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ НА ПРОМИСЛОВОМУ ПІДПРИЄМСТВІ ЗА ДОПОМОГОЮ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ

І. Бережний, І. Мостовенко, В. Коваленко 116
РОЛЬ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІДПРИЄМСТВА

І. Моря, І. Мостовенко, В. Коваленко 118
АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ЯК ЗАСІБ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

О. Садовой, І. Мостовенко, В. Коваленко 120
ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

Ю. Ліщук, І. Мостовенко, Ю. Барабанов, Д. Ципленков 122
ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ СТАНДАРТІВ ISO 50001 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Ю. Ліщук, І. Мостовенко, Ю. Барабанов, А. Гребенюк 124
ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЕНЕРГОАУДИТУ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВТРАТ

В. Коваленко, Ю. Ліщук, І. Мостовенко, Ю. Барабанов, О. Бобров 126
РОЗРОБКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТРАТЕГІЇ ПІДПРИЄМСТВА В УМОВАХ ЗРОСТАННЯ ВАРТОСТІ ЕНЕРГОНОСІЇВ

І. Коваленко, Д. Осадчий, С. Тимченко , В. Коваленко 128
ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СПОЖИВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРОМИСЛОВИМ ПІДПРИЄМСТВОМ

І. Коваленко, Д. Коломієць, Д. Причиненко, В. Коваленко 132
ВДОСКОНАЛЕННЯ РЕЖИМНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ ТА АГРЕГАТІВ ГІДРОСТАНЦІЙ

І. Коваленко, К. Рибка, С. Тимченко, В. Коваленко 134
ВАРІАНТНІ РОЗРАХУНКИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЕКТУВАННЯ РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЇВ ВВОДІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ

Р. Єсін, І. Стрєлєнко, В. Коваленко, 136
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВОГО ПІДПРИЄМСТВА ЗА РАХУНОК УТИЛІЗАЦІЇ ОБОРОТНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВОД

В. Таратута, В. Абузяров, В. Коваленко, 138
ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ НАГРІВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ КОНТРОЛЬОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

І. Коваленко, К. Ткаченко, С. Тимченко, В. Коваленко 140
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

І. Коваленко, К. Ткаченко, В. Коваленко 142
BADANIA NAD EFEKTYWNOŚCIĄ SYSTEMÓW INTELIGENTNYCH Z ODNAWIALNYMI ŹRÓDŁAMI ENERGII

В. Кутик, О. Тюнін, В. Коваленко 144
ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА БАЗІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ