

## СЦЕНАРНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА КРИТЕРІЯМИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

Запропоновано підхід до сценарної оптимізації режимів електричних мереж за критеріями якості електроенергії. Показано, що за сучасних умов оптимальний режим не може визначитися лише мінімумом втрат потужності або допустимим завантаженням обладнання. Необхідно одночасно враховувати відхилення напруги, несиметрію, гармонічні спотворення, режими реактивної потужності, роботу трансформаторів з РПН, конденсаторних установок, інверторних джерел ВДЕ та систем накопичення енергії. Обґрунтовано доцільність переходу від разового розрахунку режиму до сценарного керування, яке враховує зміну конфігурації мережі, профілю навантаження та складу розосереджених джерел.

**Ключові слова:** електрична мережа, оптимізація режиму, якість електроенергії, відхилення напруги, гармоніки, реактивна потужність, ВДЕ, BESS, інверторні джерела.

### Abstract

An approach to scenario-based optimization of electrical network operating modes according to power quality criteria is proposed. It is shown that under modern conditions the optimal operating mode cannot be determined only by minimum power losses or permissible equipment loading. Voltage deviations, unbalance, harmonic distortion, reactive power flows, operation of transformers with on-load tap changers, capacitor banks, inverter-based renewable energy sources, and battery energy storage systems should be considered simultaneously. The feasibility of transition from one-time operating mode calculation to scenario-based control, taking into account changes in network configuration, load profile, and distributed generation composition, is substantiated.

**Keywords:** electrical network, operating mode optimization, power quality, voltage deviation, harmonics, reactive power, renewable energy sources, BESS, inverter-based resources.

Оптимізація режимів електричних мереж традиційно розглядається як задача мінімізації втрат активної потужності, забезпечення допустимих рівнів напруги та недопущення перевантаження елементів мережі. Проте в сучасних умовах такий підхід є недостатнім. Зміна структури споживання, збільшення кількості інверторних джерел генерації, розвиток систем накопичення енергії, електротранспорту та силової електроніки призводять до того, що якість електроенергії стає не наслідком правильного режиму, а самостійним критерієм оптимізації.

В Україні вимоги до функціонування розподільних мереж і забезпечення якості електропостачання визначаються Кодексом систем розподілу [1]. Водночас практична задача оператора мережі полягає не лише в реагуванні на скарги споживачів, а в попереджувальному керуванні режимом, за якого параметри напруги зберігаються в допустимих межах при зміні навантаження, генерації та схеми живлення. Саме тому доцільно переходити від статичного аналізу окремого режиму до набору розрахункових сценаріїв.

Базовим показником якості електроенергії є напруга в точках приєднання споживачів. ДСТУ EN 50160:2023 визначає характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення [2]. Для режимної оптимізації це означає, що цільова функція повинна враховувати не лише середній рівень напруги, а й тривалість і глибину відхилень, несиметрію фаз, короточасні зміни та вплив режиму мережі на різні групи споживачів.

Коректне оцінювання якості електроенергії неможливе без стандартизованих вимірювань. ДСТУ EN 61000-4-30:2022 встановлює методи вимірювання параметрів якості електроенергії [3]. Це принципово

важливо, оскільки разове вимірювання напруги або струму не дає повної інформації про фактичний стан мережі. Для оптимізації потрібні часові ряди вимірювань, які відображають добові графіки навантаження, роботу ВДЕ, перемикання обладнання та періоди найбільшого погіршення якості електроенергії.

Окремим фактором є гармонічні спотворення. Їх зростання пов'язане з роботою частотних перетворювачів, зарядних станцій електротранспорту, інверторів СЕС, BESS та нелінійних промислових навантажень. IEEE 519-2022 встановлює цілі щодо обмеження гармонічних спотворень напруги та струму в точці спільного приєднання [4]. Тому оптимізація режиму мережі має враховувати не лише баланс активної та реактивної потужності, а й можливість появи резонансних режимів, перевантаження фільтрів, трансформаторів і кабельних ліній гармонічними складовими.

Сучасна електрична мережа дедалі більше залежить від силової електроніки. За матеріалами CIGRE, перехід до низьковуглецевих енергосистем супроводжується зростанням частки перетворювальної техніки, що безпосередньо впливає на тенденції у сфері якості електроенергії [5]. Це змінює саму постановку задачі оптимізації: інвертори ВДЕ та накопичувачів мають розглядатися не тільки як джерела активної потужності, а і як потенційні засоби локального регулювання напруги та реактивної потужності.

Практично сценарна оптимізація режиму може включати керування положеннями РПН трансформаторів, перемикання секцій конденсаторних установок, зміну точок нормального розриву мережі, обмеження або перерозподіл реактивної потужності інверторних джерел, режими заряджання і розряджання BESS, а також вибір конфігурації мережі в післяаварійних умовах. При цьому кожне рішення повинно перевірятися не тільки за втратами потужності, а й за показниками напруги, несиметрії, гармонік, завантаження елементів мережі та кількості комутаційних операцій.

Для умов України особливого значення набуває робота мереж у змінних і тимчасових конфігураціях. Пошкодження обладнання, резервні схеми живлення, приєднання малих джерел генерації та локальних накопичувачів створюють ситуації, коли попередньо налаштовані режими регулювання напруги стають неефективними. У таких умовах оптимізація повинна виконуватися не для однієї «нормальної» схеми, а для матриці сценаріїв: денний максимум СЕС, вечірній максимум навантаження, мінімальне нічне навантаження, ремонтна схема, післяаварійна схема, режим із заряджанням BESS та режим із реверсивним потоком потужності.

Світова тенденція також підтверджує зростання ролі електричних мереж як активного елемента енергетичного переходу. IEA підкреслює, що мережі можуть стати вузьким місцем для безпечного енергетичного переходу, якщо їх розвиток і керування не відповідатимуть новій структурі генерації та споживання [6]. Отже, оптимізація режимів мереж повинна поєднувати технічну надійність, якість електроенергії та здатність інтегрувати нові енергетичні ресурси.

### **Висновки**

Оптимізація режимів електричних мереж у сучасних умовах має виконуватися за багатокритеріальним підходом, у якому якість електроенергії є одним із ключових критеріїв. Недостатньо мінімізувати втрати потужності або підтримувати напругу лише в контрольних вузлах. Необхідно враховувати відхилення напруги, несиметрію, гармонічні спотворення, роботу інверторних джерел, BESS, РПН трансформаторів і компенсуючих пристроїв. Найбільш обґрунтованим є сценарний підхід, який дозволяє оцінювати режими мережі для різних конфігурацій, профілів навантаження, рівнів генерації ВДЕ та післяаварійних станів. Це створює основу для підвищення якості електроенергії, зменшення пошкоджуваності обладнання та забезпечення стійкої роботи електричних мереж.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Про затвердження Кодексу систем розподілу : постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 310. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18>.
2. ДСТУ EN 50160:2023. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023.

3. ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Електромагнітна сумісність (ЕМС). Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії (EN 61000-4-30:2015, IDT; IEC 61000-4-30:2015, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
4. IEEE Std 519-2022. IEEE Standard for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York : IEEE, 2022.
5. Power quality trends in the transition to carbon-free electrical energy systems. CIGRE, 2020. URL: <https://www.cigre.org/article/power-quality-trends-in-the-transition-to-carbon-free-electrical-energy-systems>.
6. Electricity Grids and Secure Energy Transitions. International Energy Agency, 2023. URL: <https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions>.

**Акімочкін Євген Леонідович** — студент групи 2ЕСМ-226 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

**Вишневецький Святослав Янович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: [svyato.vish.ua@gmail.com](mailto:svyato.vish.ua@gmail.com)

**Akimochkin Yevhen L.** — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

**Sviatoslav Ya. Vyshnevskiy** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: [svyato.vish.ua@gmail.com](mailto:svyato.vish.ua@gmail.com)