Технічні науки

УДК 621.311

**Сезонова Ірина Костянтинівна**

*кандидат технічних наук, доцент,*

*професор кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій*

*та робототехніки*

*Харківський національний університет радіоелектроніки*

**Sezonova Iryna**

*PhD in Technical Sciences*

*Department of automation, computer-integrated technologies and robotics*

*Kharkiv National University of Radio Electronics*

**Губарь Артем Юрійович**

*аспірант кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій*

*та робототехніки*

*Харківського національного університету радіоелектроніки*

**Hubar Artem**

*Postgraduate of the*

*Department of automation, computer-integrated technologies and robotics*

*Kharkiv National University of Radio Electronics*

# АВТОМАТИЗАЦІЯ УПРАВЛІННЯ ЕЛЕМЕНТАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ ЯК ЧИННИК ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

# AUTOMATION OF POWER GRID ELEMENTS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY UNDER MODERN CHALLENGES

***Анотація.*** *У статті розглянуто проблему підвищення енергоефективності електроенергетичних мереж шляхом впровадження автоматизованих систем керування. Проаналізовано сучасні виклики*

*енергетичних систем, зокрема зростання навантажень, зношеність інфраструктури та необхідність інтеграції відновлюваних джерел енергії. Визначено роль технологій Smart Grid, систем автоматизації підстанцій та моніторингу в реальному часі у забезпеченні стабільності та надійності електропостачання. Окреслено актуальність впровадження інтелектуальних мереж в Україні в умовах підвищених ризиків функціонування енергетичної інфраструктури.*

***Ключові слова:*** *енергоефективність, електроенергетична мережа, автоматизація, Smart Grid, енергетична безпека, моніторинг, втрати електроенергії.*

***Summary.*** *This paper addresses the relevance of automating power grid elements as a key factor for enhancing energy efficiency and ensuring reliable electricity supply. The study analyzes modern Smart Grid technologies, substation automation, and demand response management systems, including ABB Ability, Siemens Spectrum Power, Schneider Electric EcoStruxure, and Oracle Opower. Statistical data on energy losses, efficiency of automated systems implementation in various countries, and formulas for calculating energy efficiency and losses are presented. The importance of automation implementation for strengthening Ukraine's energy security and optimizing power grid operation is emphasized.*

***Key words:*** *energy efficiency, automation, Smart Grid, substations, demand response, energy security.*

Енергія є одним із базових ресурсів розвитку сучасного суспільства, ефективність використання якого безпосередньо впливає на економічну стабільність, екологічний стан та рівень технологічного прогресу. У XXI столітті питання енергоефективності набуває особливого значення у зв'язку зі зростанням світового попиту на електроенергію, виснаженням традиційних енергоресурсів та посиленням екологічних обмежень.

Раціональне використання електроенергії передбачає не лише зменшення обсягів споживання, але й оптимізацію процесів генерації, передачі та розподілу. Значна частина втрат енергії виникає саме на етапах транспортування та розподілу, що обумовлює необхідність модернізації електроенергетичних мереж.

Одним із найбільш ефективних інструментів підвищення енергоефективності є автоматизація управління елементами електроенергетичних систем. Використання інтелектуальних систем моніторингу та керування дозволяє забезпечити адаптивність мереж, підвищити надійність електропостачання та зменшити технічні втрати [1].

Сучасні електроенергетичні мережі функціонують в умовах постійного ускладнення режимів роботи. До основних факторів, що впливають на їх ефективність, належать:

– зростання електричних навантажень;
– фізичний та моральний знос обладнання;
– інтеграція відновлюваних джерел енергії;
– нерівномірність графіків споживання;
– підвищення вимог до надійності та якості електропостачання.

За оцінками міжнародних енергетичних організацій, середній рівень технічних втрат електроенергії у мережах передачі та розподілу у світі становить приблизно 5–15 % від загального обсягу виробництва. У країнах із застарілою інфраструктурою цей показник може перевищувати 15–20 %.

Втрати електроенергії формуються під впливом таких чинників:

– активні втрати у провідниках;
– втрати у трансформаторах;
– реактивні потоки потужності;
– нерівномірність навантажень;
– недосконаліть режимів керування.

Дослідження показують, що зношеність мережевого обладнання істотно впливає на ефективність функціонування енергосистем. У багатьох енергосистемах частка обладнання, яке експлуатується понад нормативний термін служби, перевищує 40–60 %. Це призводить до:

– зростання аварійності;
– підвищення технічних втрат;
– збільшення витрат на обслуговування;
– зниження надійності електропостачання.

Крім технічних факторів, суттєву роль відіграють режимні аспекти. Пікові навантаження можуть перевищувати середні значення у 1,5–2 рази, що створює додаткові навантаження на мережеві елементи та підвищує ризик перевантажень [2,3].

Автоматизація електроенергетичних мереж передбачає впровадження комплексних технічних рішень, спрямованих на безперервний контроль, аналіз та керування режимами роботи системи.

Концепція Smart Grid базується на інтеграції інформаційних технологій, засобів зв'язку та автоматизованих систем керування. Інтелектуальні мережі забезпечують двосторонній обмін інформацією між джерелами енергії та споживачами, що дозволяє реалізувати адаптивне керування навантаженнями.

Основними перевагами Smart Grid є:

– зниження технічних втрат;
– підвищення надійності електропостачання;
– оптимізація режимів роботи;
– ефективна інтеграція відновлюваних джерел енергії;
– покращення якості електроенергії.

Практичні результати впровадження інтелектуальних мереж у різних країнах демонструють зниження втрат електроенергії в межах 10-30 % залежно від стану інфраструктури та рівня цифровізації [4].

Автоматизовані підстанції дозволяють здійснювати дистанційний контроль та керування обладнанням. Використання цифрових релейних захистів, інтелектуальних вимірювальних пристроїв та систем діагностики сприяє підвищенню стабільності роботи мережі та зменшенню кількості аварійних відключень.

Системи моніторингу забезпечують безперервний контроль параметрів електричних режимів. Застосування аналітичних алгоритмів дозволяє зменшити ймовірність аварій та оптимізувати розподіл потужності.

Кількісна оцінка ефективності електроенергетичних мереж базується на аналізі втрат електроенергії та коефіцієнтів ефективності.

Основною математичною моделлю, яка використовується для досліджень енергоефективності мереж є модель втрат, яка описується наступними залежностями.

Втрати активної потужності у лініях електропередачі ΔP обчислюються за формулою (1)

$$\Delta P = \frac{P^2+Q^2}{U^2} \cdot R \qquad (1)$$

де: ΔP – втрати активної потужності в лінії, Вт; P – активна потужність, Вт; Q – реактивна потужність, var; U– напруга, В; R– опір лінії, Ом.

Формула показує, що втрати зростають пропорційно квадрату переданої потужності та зменшуються при підвищенні напруги, що пояснює використання високовольтних мереж передачі.

Відносні втрати електроенергії описуються відповідним коефіцієнтом за формулою (2)

$$k_{\text{втр}} = \frac{\Delta W}{W_{\text{перед}}} \quad (2)$$

де: $k_{\text{втр}}$– коефіцієнт втрат (безрозмірна величина або %); $\Delta W$– втрати електроенергії за розрахунковий період, кВт·год; $W_{\text{перед}}$– обсяг переданої електроенергії, кВт·год.

Цей показник характеризує загальну ефективність передачі та розподілу електроенергії.

Коефіцієнт завантаження мережі обчислюється як (3)

$$k_{\text{зав}} = \frac{P_{\text{сер}}}{P_{\text{макс}}} \quad (3)$$

де: $k_{\text{зав}}$– коефіцієнт завантаження; $P_{\text{сер}}$– середня потужність за певний період, Вт; $P_{\text{макс}}$– максимальна (пікова) потужність, Вт.

Чим ближче коефіцієнт до 1, тим ефективніше використовується інфраструктура мережі.

Коефіцієнт підвищення енергоефективності після автоматизації (4)

$$E_{\text{еф}} = \frac{\Delta W_{\text{до}} - \Delta W_{\text{після}}}{\Delta W_{\text{до}}} \cdot 100\% \quad (4)$$

де: $E_{\text{еф}}$– показник підвищення енергоефективності, %; $\Delta W_{\text{до}}$– втрати електроенергії до впровадження автоматизації, кВт·год; $\Delta W_{\text{після}}$– втрати після впровадження автоматизованої системи, кВт·год.

Формула (4) дозволяє оцінити ефективність модернізації мережі.

Показник економії електроенергії

$$W_{\text{ек}} = W_{\text{баз}} - W_{\text{факт}} \quad (5)$$

де: $W_{ек}$– обсяг зекономленої електроенергії, кВт·год; $W_{баз}$– базове (розрахункове) споживання, кВт·год; $W_{факт}$– фактичне споживання після впровадження систем автоматизації, кВт·год

Інтеграція відновлюваних джерел енергії потребує застосування автоматизованих алгоритмів балансування. Використання інтелектуальних систем дозволяє мінімізувати коливання напруги, зменшити перевантаження та підвищити стабільність режимів роботи.

Приклади реалізації можемо спостерігати в США, Німеччині та інших країнах. В США Smart Grid після прийняття Recovery and Reform Act 2009 відбулось зменшення втрат в електромережах на 10–15%, покращення надійності, інтеграція з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) збільшилось до 20% [5,6]. Політика Німеччини Energiewende дозволила збільшити частку ВДЕ до 50%, зменшила викиди $CO_2$ на 42% порівняно з 1990 р. [7,8]. Південна Корея (Gwangju): Smart Grid зменшили пікові навантаження на 20%, що призвело до суттєвої економії електроенергії [9].

Автоматизація мереж в Україні є критично важливою з огляду на зношеність інфраструктури та підвищені вимоги до стійкості енергосистеми. Впровадження сучасних технологій дозволить суттєво знизити втрати та підвищити надійність електропостачання. Автоматизація управління елементами електроенергетичних мереж є ключовим чинником підвищення енергоефективності, надійності та стабільності енергосистем.

## Література

1. European-Ukrainian Energy Agency. Огляд Стратегії енергетичної безпеки України. URL: https://euea-energyagency.org/uk/novyny-ta-podiyi/novyny-rynku/oglyad-strategiyi-energetychnoyi-bezpeky-ukrayiny-vid-yeuea/ (дата звернення: 10.02.2026).

2. Siemens. Grid Control. URL: https://www.siemens.com/global/en/products/energy/grid-software/operation/grid-control.html (дата звернення: 10.02.2026).

3. Schneider Electric. EcoStruxure. URL: https://www.se.com/ww/en/work/campaign/innovation/platform.jsp (дата звернення: 10.02.2026).

4. GE Vernova. Grid Solutions. URL: https://www.gevernova.com/grid-solutions/ (дата звернення: 10.02.2026).

5. International Energy Agency. Smart Grids. URL: https://www.iea.org/reports/smart-grids (дата звернення: 10.02.2026).

6. U.S. Department of Energy. Smart Grid System Report. URL: https://www.energy.gov/oe/activities/technology-development/grid-modernization-and-smart-grid (дата звернення: 10.02.2026).

7. Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK). Energiewende Report. URL: https://www.bmwk.de (дата звернення: 10.02.2026).

8. International Energy Agency. Germany Energy Profile. URL: https://www.iea.org/countries/germany (дата звернення: 10.02.2026).

9. Korea Electric Power Corporation (KEPCO). Smart Grid Initiatives in Korea. URL: https://home.kepco.co.kr (дата звернення: 10.02.2026).

10. Gellings C. W. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. Boca Raton: CRC Press, 2009. 300 p.

11. Momoh J. Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. 280 p.

12. Brown R. Electric Power Distribution Reliability. Boca Raton: CRC Press, 2008. 350 p.