

СЕРГІЙ ЯСАК

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

<https://orcid.org/0009-0009-9250-0961>e-mail: serhii.yasak@ieeee.khpi.edu.ua

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЧНОГО ЧАСТОТНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ У ЕНЕРГОСИСТЕМІ

У напрацюваннях розглянуто теоретичні аспекти підвищення ефективності частотного розвантаження енергосистеми автоматичним способом. Для цього використовуються певні параметри налаштування відповідного обладнання до роботи. Сформовано критерії автоматичного частотного розвантаження мережі та послідовність майбутніх дій для експериментального дослідження тематики. Серед критеріїв виділено використання промислових контролерів з різними видами інтерфейсів для зменшення часу реагування на аварію, використання інструментів оцінювання якості електричної енергії. Представлено імітаційну модель автоматичного частотного розвантаження (далі АЧР) енергосистеми з використанням мови програмування Python. Модель враховує баланс потужності між генерацією та навантаженням, де зміна частоти описується рівнянням $\Delta F = k \cdot (P_{\text{gen}} - P_{\text{load}}) + \xi$. Система включає 20 випадково розподілених споживачів (5–15 МВт) та 4 ступені АЧР із порогами 49.5, 49.0, 48.5 та 48.0 Гц. Результати демонструють, що при дефіциті потужності (-0.6 Гц/сек) частота падає до 49.4 Гц, але після послідовного відключення 30% навантаження стабілізується на номінальному рівні (50 Гц). Візуалізація підтверджує ефективність багатоступеневої АЧР, хоча модель не враховує інерцію генераторів та мережеві ефекти. Дослідження підкреслює важливість АЧР для запобігання аваріям у енергосистемах. Виявлено нелінійний зв'язок між кількістю ступенів АЧР та часом стабілізації, що відкриває перспективи для оптимізації параметрів захисту. Отримані результати можуть бути використані для прогнозування аварійних сценаріїв в умовах змінних навантажень. Запропонований інструментарій рекомендовано використовувати як додатковий елемент підтримки енергетичної безпеки країни.

Ключові слова: енергосистема, частотне розвантаження, небаланс потужностей, імітаційна модель, цифровий двійник.

YASAK SERHIY

National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»

THEORETICAL FOUNDATIONS FOR IMPROVING THE EFFICIENCY OF AUTOMATIC LOAD SHEDDING IN A POWER SYSTEM

The study examines theoretical aspects of improving the efficiency of automatic load shedding in power systems. This utilizes specific parameters for setting up the relevant equipment for operation. Criteria for automatic load shedding of the network and a sequence of future actions for experimental research on the topic have been formed. Among the criteria highlighted are the use of industrial controllers with different types of interfaces to reduce emergency response time, and the use of power quality assessment tools. A simulation model of Automatic Load Shedding (ALS) for a power system using the Python programming language is presented. The model accounts for the power balance between generation and load, where the frequency change is described by the equation $\Delta F = k \cdot (P_{\text{gen}} - P_{\text{load}}) + \xi$. The system includes 20 randomly distributed consumers (5–15 MW) and 4 ALS stages with thresholds of 49.5, 49.0, 48.5, and 48.0 Hz. The results demonstrate that during a power deficit (-0.6 Hz/sec), the frequency drops to 49.4 Hz, but after sequentially disconnecting 30% of the load, it stabilizes at the nominal level (50 Hz). Visualization confirms the effectiveness of multi-stage ALS, although the model does not account for generator inertia and network effects. The research underscores the importance of ALS for preventing accidents in power systems. A nonlinear relationship between the number of ALS stages and the stabilization time was identified, opening prospects for optimizing protection parameters. The obtained results can be used for predicting emergency scenarios under variable load conditions. The proposed toolkit is recommended for use as an additional element for supporting the country's energy security. It complements and expands the capabilities of existing solutions.

Keywords: power system, load shedding, power imbalance, simulation model, digital twin..

Стаття надійшла до редакції / Received 09.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Вступ

Підвищення швидкодії частотного розвантаження зменшує вплив небалансу потужностей енергосистеми [1] за стандартизованими процедурами [2] та правилами [3]. Існує низка моделей підвищення 2 ефективності частотного розвантаження [4], де як показує практика не враховуються у повному обсязі особливості електромережі, добові та сезонні зміни потужностей генерації і споживання електроенергії. Вказані у роботі [4] моделі налаштовують враховуючи досвід Європейського Союзу [5]. Сучасні виробники електротехнічної продукції пропонують низку рішень щодо підвищення ефективності автоматичного частотного розвантаження, тому єдиної процедури не існує. Саме тому актуалізується питання поглибленого опрацювання теоретичних аспектів поліпшення ефективності частотного розвантаження у енергосистемі.

Мета: дослідити теоретичні аспекти процедури автоматичного розвантаження енергосистеми для формування критеріїв підвищення його ефективності.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати теоретичні основи процесу автоматичного частотного розвантаження електромережі.
2. Сформулювати критерії автоматичного частотного розвантаження мережі та послідовність майбутніх дій для експериментального дослідження тематики.
3. Створити модель автоматичного частотного розвантаження із врахуванням балансу потужності.

Виклад основного матеріалу

Процес частотного розвантаження енергосистеми нараховує низку параметрів, які потрібно ефективно використовувати. У ручному режимі змоделювати поведінку складно, тому розглядаються математичні моделі, які дозволяють оптимально визначити кожен параметр залежно від типу ситуації, що склалася [7].

Математичні моделі за типом можуть бути динамічні та інтелектуальні. Наприклад у роботі [8] показано інформацію про інтелектуальну систему управління та контролю параметрів основою якої є мікроконтролер. Головною перевагою рішення є не лише частотне розвантаження мережі, а й різні види захисту та функції керування за допомогою RS-485.

Крім пристроїв інтелектуального моніторингу електричної мережі існує ряд математичних інструментів щодо оцінки якості електроенергії. Наприклад у роботі [9] для визначення кількісної оцінки якості електроенергії використовується еквівалентний реактивний споживач. Перевагою цього методу є підвищення коефіцієнту потужності із 0,835 до 0,842. Тобто абсолютна різниця становить $0,842 - 0,835 = 0,007$, а відносна – 3 0,838%, що показує перевагу запропонованого рішення порівняно з існуючим. Тобто, для виявлення шляхів ефективного частотного розвантаження електричної мережі необхідно розробити або удосконалити існуючий метою оцінки якості електричної мережі. Навіть якщо вдасться повторити успіх, як у роботі [9], це буде ознакою наукової новизни дослідження.

У роботі [10] іде мова про визначення джерела вищих гармонік у системах електропостачання зі змішаним навантаженням. За результатами досліджень проведено комп'ютерне моделювання фрагменту електричної мережі та електроприймачів навантажень, що працюють паралельно. Досліджено різні комбінації активного, реактивного та нелінійного навантаження в цій мережі. Перевагою роботи є те, що використовувалися різні моделі схем електропостачання.

Крім робіт академічних [7-10], частотне розвантаження регламентують міжнародні стандарти, про це ми згадували на початку. Наприклад IEC 61850 [11], описує класичну архітектуру мережі електропостачання та протоколи зв'язку. Це все можливо реалізувати на промислових контролерах Siemens SIMATIC, Allen-Bradley та інших з підтримкою інтерфейсів Modbus RTU/TCP. Стандарт ДСТУ EN 50160:2023 містить характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT) [12].

Таким чином підвищення ефективності розвантаження вирішується через комбінацію апаратних засобів (швидкі контролери), стандартизованих інтерфейсів (IEC 61850) та алгоритмів автоматичного частотного розвантаження з адаптацією до реальних умов. Розглянемо ключові етапи автоматичного частотного розвантаження. Моделювання → стендові тести → впровадження → моніторинг. Для успіху важливий вибір обладнання з достатньою швидкодією та інтеграція з системами моніторингу якості енергії.

Тож враховуючи досвід проаналізованих робіт критеріями підвищення ефективності частотного розвантаження є: 1. Використання контролерів із підтримкою GOOSE (IEC 61850-8-1) для часу реакції < 20 мс; 2. Використання інструментів оцінювання якості електричної енергії. Це дозволяє сформулювати і кроки наступних дій стосовно вирішення проблеми частотного розвантаження. Теоретичні завдання мають включати розробку математичних моделей АЧР, створення методів оптимізації налаштувань, розробку алгоритмів адаптивного частотного розвантаження та формування критеріїв оцінки ефективності. Ці аспекти дозволять забезпечити покращення якості роботи енергосистем з урахуванням сучасних викликів. Для їх реалізації пропонується наступний практичний план дій:

1. Створення імітаційної моделі в середовищі MATLAB/Simulink або RTDS: о Моделювання аварійних сценаріїв (наприклад, раптове відключення генерації); о Перевірка роботи алгоритмів АЧР при різних рівнях небалансу потужностей.

2. Стендові випробування на базі промислового контролера (наприклад, Siemens SIPROTEC): о Підключення до імітованої мережі з можливістю зміни частоти (50 Гц → 48 Гц); о Вимірювання часу реакції системи при використанні різних інтерфейсів (Modbus TCP vs GOOSE).

3. Польові тести у реальній енергосистемі: о Впровадження прототипу на діючій підстанції; о Збір даних про якість енергії (згідно з ДСТУ EN 50160) після спрацювання АЧР.

4. Оптимізація алгоритмів на основі отриманих даних: о Корекція порогів спрацювання з урахуванням сезонних навантажень; о Інтеграція з SCADA-системою для моніторингу в реальному часі.

Розглянемо типовий процес моделювання автоматичного частотного розвантаження мовою програмування python, враховуючи тільки баланс потужності. Модель енергосистеми складається із 20 споживачів з навантаженнями у діапазоні [5, 15] МВт, які задано випадково, має певну потужність генерації МВт й сумарне навантаження МВт при частотах поточній 50 Гц та номінальній 50 Гц. Автоматичне частотне розвантаження нараховує 4 ступені із частотою 49,5; 49,0; 48,5; 48,0. При моделюванні використовувалися випадкові коливання у діапазоні [-0,05, 0,05]. Відключення споживачів відбувається послідовно, доки не компенсується заданий відсоток навантаження при умові $\text{if } \text{abs}(\text{freq} - \text{nominal_frequency}) < 0.1 \text{ and } t > 10$. Симуляція припиняється, якщо частота стабілізується близько до номінальної (± 0.1 Гц) після 10 кроків. Для визначення зміни частоти використовується відома формула:

$$\Delta F = k \cdot (P_{\text{gen}} - P_{\text{load}}) + \xi, \quad (1)$$

де ΔF – зміна частоти за крок часу (Гц);

$k = 0.01$ – коефіцієнт чутливості системи (Гц/МВт);

P_{gen} – потужність генерації (МВт);

P_{load} – сумарне навантаження (МВт);
 $\xi \sim U(-0.05, 0.05)$ – випадкові коливання (шум).
 На рис. 1 подані результати моделювання.

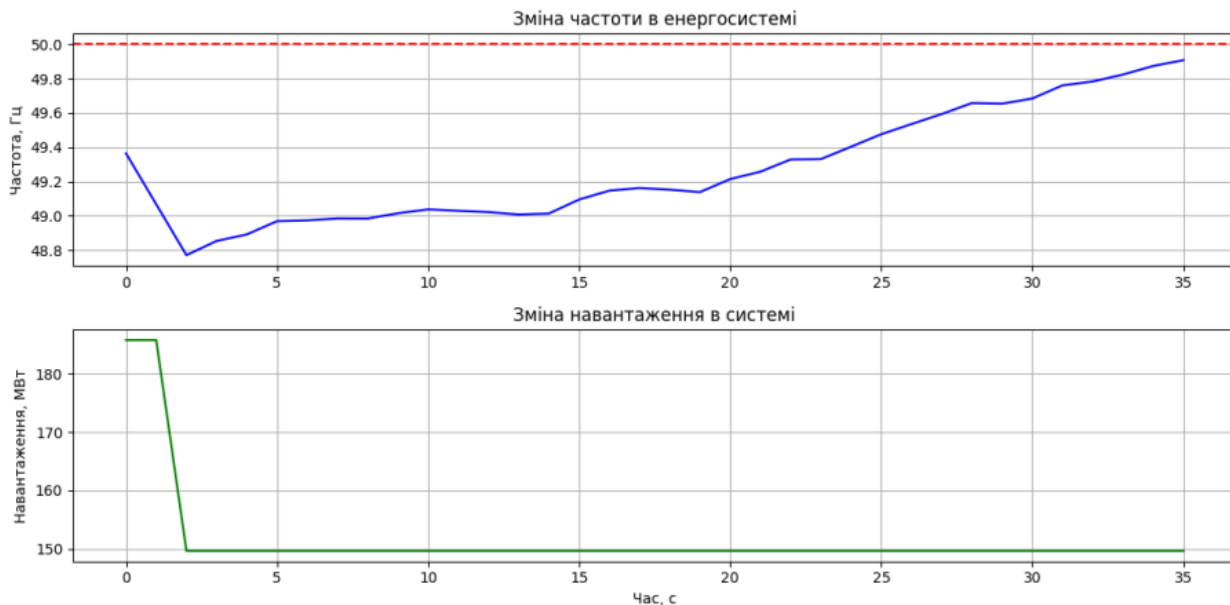


Рис. 1. Результати моделювання автоматичного частотного розвантаження із врахуванням балансу потужності у кілька ступенів

Як видно із рис. 1, вгорі показано зменшення частоти, котра зменшилася до 49,4 Гц на проміжку від 0 до 1 секунди (режим аварії), потім від 5 до 35 секунд частота зростає. Тобто система запобігла глибокому падінню частоти, оскільки частота падає -0.6 Гц/сек. Після спрацювання частотного розвантаження відключено 30% навантаження (60 МВт), де нове навантаження становить 140 МВт. У нижній частині рис. 1 показано залежність навантаження від часу, що свідчить про стабілізацію навантаження залежно від частоти. Стабілізація навантаження не є миттєвою, на графіку видно кілька ступенів частотного розвантаження, кожен з яких «піднімає» частоту. Відмітимо, що створена модель має певні обмеження. Не враховано інерцію генераторів, відсутня автоматика регулювання генерації, модель ігнорує топологію мережі.

Висновки

Встановлено, автоматичне частотне розвантаження реалізовується промисловими контролерами із різною кількістю налаштувань певних моделей виявлення якості електроенергії. Запропоновано критерії поліпшення частотного розвантаження. Встановлено, що комбінація апаратних засобів із стандартизованими інтерфейсами зменшує час реакції порівняно з традиційними рішеннями. Експериментальне дослідження має спиратися на порівняльний аналіз часу реакції в умовах імітованих аварій. Результати створеної моделі показали коректну роботу багатоступеневого розвантаження частотою, яка забезпечила відновлення балансу між генерацією та навантаженням без загрози для стабільності системи. Плавне зростання частоти після 5 секунд та стабілізація навантаження підтверджують, що відключення споживачів повністю компенсувало дефіцит потужності.

Література

1. Яндульський О. С. Деякі аспекти роботи автоматичного частотного розвантаження / О. С. Яндульський, О. В. Тимохін, А. О. Тимохіна // Наукові праці ВНТУ. – 2014. – № 4. – С. 1–7.
2. Eepublicdownloads // https://eepublicdownloads.entsoe.eu/cleandocuments/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_5_final.pdf.
3. ГНД 34.20.567-2003 Правила застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах [Електронний ресурс] // БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61176
4. Литвинчук В. А. Розрахунок доцільного обсягу автоматичного частотного розвантаження і його розміщення в енергосистемі з розподіленими джерелами електричної енергії [Електронний ресурс] / В. А. Литвинчук, М. І. Каплін, О. О. Кармазін // Vidnovluvana energetika. – 2021. – № 1(64). – С. 18–30. – Режим доступу: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\).18-30](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64).18-30)
5. Steliuk A. O. Configuration analysis of under-frequency load shedding relays considering european requirements [Electronic resource] / A. O. Steliuk, L. M. Lukianenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2024. – Vol. 2024, no. 5. – P. 79–84. – Mode of access: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.079>

6. Оптимальне автоматичне частотне розвантаження енергосистем | Вісник Вінницького політехнічного інституту [Електронний ресурс] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1157>
7. Оптимальне автоматичне частотне розвантаження енергосистем [Електронний ресурс] // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1157/1155>
8. Бартошевський Р. Intelligent system of management and control of electrical network parameters / Р. Бартошевський, Б. Оробчук // Актуальні задачі сучасних технологій : Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів, Тернопіль, 7–8 December 2022. – С. 82–83.
9. Гапон Д. Оцінка реактивності змішаного навантаження у несинусоїдальних режимах [Електронний ресурс] / Д. Гапон, П. Качанов // eNTUKhPIIR :: Головна. – Режим доступу: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/27c497ed-596c-466b-86b4-6f947d216710/content>
10. Determination of higher harmonics source in mixed-load power supply systems [Electronic resource] / Dmytro Gapon [et al.] // Advanced Information Systems. – 2022. – Vol. 6, no. 1. – P. 55–60. – Mode of access: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.09>
11. ДСТУ ІЕС 61850-5:2019 Комунікаційні мережі та системи для автоматизації електроенергетичних підприємств. Частина 5. Технічні вимоги до функцій і моделей приладів (ІЕС 61850-5:2013, IDT) [Електронний ресурс] // БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=86046
12. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT) [Електронний ресурс] // БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226

References

1. Yandul's'kyi O. S. Deyaki aspekty roboty avtomatychnoho chastotnoho rozvantazhennya / O. S. Yandul's'kyi, O. V. Tymokhin, A. O. Tymokhina // Naukovipratsi VNTU. – 2014. – № 4. – С. 1–7.
2. Eepublicdownloads // https://eepublicdownloads.entsoe.eu/cleandocuments/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_5_final.pdf.
3. HND 34.20.567-2003 Pravyla zastosuvannya systemnoyi protyavariynoyi avtomatyky zapobihannya ta likvidatsiyi nebezpechnoho znyzhennya abo pidvyshchennya chastoty v enerhosystemakh [Elektronnyy resurs] // BUDSTANDART Online - normatyvni dokumenty budivel'noyi haluzi Ukrainy. – Rezhym dostupu: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61176
4. Lytvynchuk V. A. Rozrakhunok dotsil'noho obsyahu avtomatychnoho chastotnoho rozvantazhennya i yoho rozmishchennya v enerhosystemi z rozpodilenyimi dzhherelamy elektrychnoyi enerhiyi [Elektronnyy resurs] / V. A. Lytvynchuk, M. I. Kaplin, O. O. Karmazin // Vidnovluyana energetika. – 2021. – № 1(64). – С. 18–30. – Rezhym dostupu: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1\(64\).18-30](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.1(64).18-30)
5. Steliuk A. O. Configuration analysis of under-frequency load shedding relays considering european requirements [Electronic resource] / A. O. Steliuk, L. M. Lukianenko // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2024. – Vol. 2024, no. 5. – P. 79–84. – Mode of access: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.079>
6. Optymal'ne avtomatychne chastotne rozvantazhennya enerhosystem | Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu [Elektronnyy resurs] // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. – Rezhym dostupu: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1157>
7. Optymal'ne avtomatychne chastotne rozvantazhennya enerhosystem [Elektronnyy resurs] // Visnyk Vinnyts'koho politekhnichnoho instytutu. – Rezhym dostupu: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1157/1155>
8. Bartoshevs'kyi R. Intelligent system of management and control of electrical network parameters / R. Bartoshevs'kyi, B. Orobchuk // Aktual'ni zadachi suchasnykh tekhnolohiy : Materialy XI Mizhnarodnoyi nauково-praktychnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh ta studentiv, Ternopil', 7–8 December 2022. – С. 82–83.
9. Hapon D. Otsinka reaktivnosti zmishanoho navantazhennya u nesynusoidal'nykh rezhymakh [Elektronnyy resurs] / D. Hapon, P. Kachanov // eNTUKhPIIR :: Holovna. – Rezhym dostupu: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/27c497ed-596c-466b-86b4-6f947d216710/content>
10. Determination of higher harmonics source in mixed-load power supply systems [Electronic resource] / Dmytro Gapon [et al.] // Advanced Information Systems. – 2022. – Vol. 6, no. 1. – P. 55–60. – Mode of access: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.09>
11. DSTU IEC 61850-5:2019 Komunikatsiyni merezhi ta systemy dlya avtomatyzatsiyi elektroenergetychnykh pidpryyemstv. Chastyna 5. Tekhnichni vymohy do funktsiy i modeley pryladiv (IEC 61850-5:2013, IDT) [Elektronnyy resurs] // BUDSTANDART Online - normatyvni dokumenty budivel'noyi haluzi Ukrainy. – Rezhym dostupu: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=86046
12. DSTU EN 50160:2023 Kharakterystyky napruhy elektropostachannya v elektrychnykh merezhakh zahal'noyi pryznachennosti (EN 50160:2022, IDT) [Elektronnyy resurs] // BUDSTANDART Online - normatyvni dokumenty budivel'noyi haluzi Ukrainy. – Rezhym dostupu: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=106226