

# ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 621.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.2.1/01>

**Ахмедов М.Ш.**

<https://orcid.org/0009-0000-7291-4328>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Федорова Н.В.**

<https://orcid.org/0000-0002-4548-4198>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ДИНАМІЧНЕ БАЛАНСУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ ТА ПРОБЛЕМИ ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ В ЕНЕРГОМЕРЕЖІ SMART GRID

*Статтю присвячено розв'язання науково-практичної задачі – підвищенню ефективності балансування навантаження в сучасних енергомережах Smart Grid шляхом розроблення методу динамічного регулювання в реальному часі. Інтенсивне зростання динамічності електроспоживання, поява розподілених джерел генерації та накопичувачів енергії докорінно змінюють характер функціонування енергосистем. Встановлено, що локальні перевантаження й короткочасні дисбаланси виникають значно частіше, ніж це передбачалося для традиційних централізованих схем регулювання, що робить швидкість реакції системи визначальним фактором.*

*У роботі проаналізовано особливості формування електричного навантаження та визначено функціональні вимоги до систем балансування на базі розподілених мікроконтролерних вузлів. Було обґрунтовано перехід від централізованих моделей до децентралізованого керування на периферійному рівні (edge computing), де рішення приймаються безпосередньо в точці виникнення відхилення. Запропонований метод інтегрує використання мікроконтролерів (STM32, ESP32), буферизацію енергії за допомогою суперконденсаторів та застосування низькорівневих протоколів комунікації (SPI, I2C, UART).*

*Особливу увагу приділено програмній реалізації на базі операційної системи реального часу FreeRTOS. Досліджено механізми планувальника завдань, пріоритизації переривань та використання черг для забезпечення детермінованості керування в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Використання суперконденсаторів у поєднанні з DC-DC перетворювачами дозволяє фізично компенсувати пікові імпульси споживання протягом мілісекунд, запобігаючи просіданню напруги в локальних сегментах мережі. Результати дослідження формують підґрунтя для створення стабільних, адаптивних мікромереж, здатних підтримувати якість електроенергії без жорсткої ієрархічної координації.*

**Ключові слова:** мікроконтролерне керування, суперконденсатори, embedded-системи, операційні системи реального часу, FreeRTOS, буферизація енергії, розподілені енергетичні системи, детерміноване керування, протоколи низького рівня, енергоефективність систем.

**Постановка проблеми.** Smart Grid змінює не лише технічну архітектуру енергосистеми, а й спосіб її поведінки. Коли генерація концентрувалася на великих електростанціях, режим мережі був відносно інерційним: навантаження прогнозу-

валося, відхилення коригувалися централізовано. Проте вже з появою розподіленої генерації ситуація стала менш однорідною. Частина потужності формується на рівні домогосподарств або малих об'єктів, частина акумулюється в накопичувачах,

а частина повертається в мережу. Відповідно, потоки більше не мають одного напрямку.

Нестабільність виникає не лише через погодні залежності відновлюваних джерел. Навіть за стабільного виробітку локальні вузли можуть швидко змінювати режим споживання. У певні інтервали виникає надлишок, в інші – дефіцит. Ці коливання не обов'язково критичні окремо, але вони взаємодіють. Частота, напруга й навантаження трансформаторів реагують синхронно, тому мережа перестає поводитися як лінійна система.

Централізоване балансування передбачає, що стан мережі можна описати агрегованими показниками. Однак варто зазначити, що у децентралізованій конфігурації цього недостатньо. Дисбаланс формується на рівні конкретного вузла, але його наслідки поширюються далі, іноді непередбачувано. Реакція із запізненням навіть у кілька секунд може змінити розподіл потоків у сусідніх гілках. Тут важливий не стільки масштаб відхилення, скільки швидкість його розвитку.

Динамічне балансування в реальному часі пов'язане з безперервним аналізом телеметрії та локальним прийняттям рішень. Частина регулювання переноситься ближче до джерела зміни режиму. Це не скасовує центральної координації, але змінює її роль: замість прямого втручання – узгодження автономних дій елементів мережі. За високої частки розподілених ресурсів така модель дозволяє зменшити перевантаження, обмежити втрати та підтримувати допустимі параметри якості електроенергії без жорсткої ієрархії керування.

Питання балансування дедалі частіше розглядається крізь призму стійкості інфраструктури, денавантаження на промислові комплекси, транспорт, цифрові платформи робить мережу чутливою до короткочасних відхилень. У цьому контексті механізми адаптивного регулювання стають складовою загальної архітектури безпеки енергосистеми.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних публікацій свідчить, що проблематика балансування навантаження в Smart Grid розвивається нерівномірно – різні автори фокусуються на різних рівнях системи. Частина досліджень концентрується на алгоритмічному аспекті управління. Так, Ф. Р. Албогамі (F. R. Albogamy) та співавтори запропонували підхід до керування енергоспоживанням із врахуванням генерації відновлюваних джерел, орієнтований на перерозподіл навантаження в пікові періоди [1]. У наступній роботі ці ж автори зміщують акцент у бік динамічного планування, де рішення коригуються залежно

від змін виробітку та споживання [2]. У цих дослідженнях помітна спроба поєднати оптимізаційні процедури з режимом реального часу.

Інший підхід демонструють Д. Канеллопулос (D. Kanelloroulos) та В. К. Шарма (V. K. Sharma), які розглядають балансування в контексті IoT-середовища, де ключовим стає масштаб підключених пристроїв і необхідність розподіленої координації [3]. У роботі Г. Григораша (G. Grigoras) та співавторів увага зміщується до конкретного технічного завдання – вирівнювання фаз навантаження на основі даних інтелектуальних лічильників [4]. Тут балансування постає не як абстрактна оптимізаційна проблема, а як інженерна задача з чітко визначеними параметрами мережі.

Паралельно формується напрям, пов'язаний із архітектурними рішеннями. Л. Хагнегахдар (L. Haghnegahdar) та співавтори пропонують мультиагентну cloud-fog модель, у якій частина обчислень перенесена на периферійний рівень для зменшення затримок реагування [5]. Подібну логіку розвивають Д. Ю (D. Yu) та співавтори, обґрунтовуючи доцільність поєднання fog- та cloud-обчислень для підтримки механізмів балансування [6]. У дослідженні Дж. Уддоха (J. Uddoh) та співавторів ця архітектурна модель доповнюється цифровими двійниками на основі штучного інтелекту, що дозволяє моделювати сценарії розподілу ресурсів до їх реалізації в реальній мережі [7]. К. Н. Куреші (K. N. Qureshi) та співавтори зосереджуються на програмно-керованій моделі Smart Grid, підкреслюючи гнучкість і масштабованість такого підходу [8].

Окрему групу становлять роботи, у яких балансування розглядається через децентралізовану взаємодію учасників енергоринку. В. Тушар (W. Tushar) та співавтори аналізують peer-to-peer механізми обміну енергією, де координація відбувається без жорсткої централізації [9]. У дослідженні О. М. Батта (O. M. Butt) та співавторів цифрові технології розглядаються як базовий чинник трансформації управління енергомережами [10]. А в свою чергу М. Інчі (M. Inci) та співавтори акцентують увагу на ролі електромобілів, які здатні виступати не лише споживачами, а й елементами балансування [11]. Робота Т. Мазхара (T. Mazhar) та співавторів розширює цей контекст, пов'язуючи розвиток Smart Grid із концепцією Industry 5.0 та інтелектуалізацією енергетичних процесів [12].

Питання оптимізації функціонування енергосистем узагальнено у дослідженні А. Джошана (A. Joshan), де розглядаються сучасні методи про-

гнозування та адаптивного управління ресурсами в умовах високої динаміки мережевих режимів [13]. У цьому підході балансування розглядається як частина ширшої проблеми ефективного управління енергетичною інфраструктурою.

Як бачимо, у публікаціях про Smart Grid переважають алгоритмічні та хмарні рішення. Натомість периферійний рівень, де працюють мікроконтролери з обмеженими ресурсами, описаний значно менше. Саме там виникають практичні труднощі: обмежена пам'ять, нестача обчислювальної потужності, жорсткі часові вимоги. Динамічне балансування в таких умовах не зводиться до оптимізаційної моделі – воно впирається в таймінги, синхронізацію задач і стабільність живлення.

Архітектури з використанням суперконденсаторів і низькорівневих протоколів комунікації також залишаються недостатньо формалізованими. Реалізація детермінованого керування на FreeRTOS залежить від конфігурації планувальника, пріоритетів і апаратних обмежень. Тому невеликі затримки передачі даних або конфлікти задач можуть змінювати поведінку системи при змінному навантаженні. Дослідження зосереджується на цьому рівні реалізації: формуються функціональні вимоги, проектується мікроконтролерна архітектура із суперконденсаторами, розробляється метод динамічного балансування під FreeRTOS з урахуванням ресурсних обмежень і часової детермінованості.

**Постановка завдання.** Метою статті є підвищення ефективності балансування навантаження в енергомережах Smart Grid шляхом розроблення запропонованого методу динамічного балансування в реальному часі на основі мікроконтролерного керування, використання суперконденсаторів, низькорівневих протоколів комунікації та операційної системи реального часу FreeRTOS.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Проаналізувати особливості формування електричного навантаження в енергомережах Smart Grid і визначити вимоги до систем балансування навантаження в реальному часі на базі розподілених мікроконтролерних вузлів.

2. Обґрунтувати архітектуру та принципи реалізації системи динамічного балансування навантаження із застосуванням мікроконтролерів, суперконденсаторів, низькорівневих протоколів комунікації та FreeRTOS.

3. Розробити запропонований метод динамічного балансування навантаження, що забезпечує

адаптивне та детерміноване керування енергетичними процесами в реальному часі.

**Виклад основного матеріалу.** Навантаження в Smart Grid формується інакше, ніж у традиційних мережах: генерація розподілена, частина споживачів може тимчасово виступати джерелами, режими роботи змінюються швидко [4]. У результаті виникають локальні піки потужності та нерівномірність розподілу енергії, які не завжди встигає компенсувати централізоване регулювання. За таких умов балансування переноситься ближче до вузлів мережі. Система має не лише фіксувати параметри, а й реагувати без суттєвої затримки. Розподілені керувальні вузли на базі мікроконтролерів забезпечують локальний контроль і скорочують час формування керувального впливу, що особливо помітно при короткочасних перевантаженнях (табл. 1).

У сегментах Smart Grid керування навантаженням фактично відбувається на рівні плати. Мікроконтролери STM32 чи ESP32 постійно працюють із сирими сигналами датчиків струму й напруги, і рішення приймаються там само – без звернення до віддаленого центру [5]. Обмеження пам'яті й тактової частоти відразу накладають рамки на складність алгоритму.

При короткочасних стрибках навантаження активується буферна ланка з суперконденсатором. Підключення здійснюється через керований перетворювач; це типовий сценарій під час запуску двигунів або раптового ввімкнення потужних споживачів. У такі моменти вирішальною стає не оптимізаційна модель, а швидкість перемикання й узгодженість дій вузлів.

Обмін між контролерами відбувається через SPI, UART або I2C – короткі пакети, мінімальна затримка, синхронізація без надлишкових рівнів протоколів. Поведінка системи значною мірою визначається конфігурацією задач у FreeRTOS: порядок виконання, пріоритети, часові інтервали [2]. У мікромережах або зарядних станціях електромобілів ця логіка відчутна буквально – балансування не «планується», воно відбувається в межах кількох мілісекунд.

Коли навантаження в локальному сегменті різко змінюється, система не має часу на централізовану координацію. Затримка в обробці даних навіть у кілька десятків мілісекунд змінює розподіл струмів у сусідніх гілках. Саме тому регулювання зміщується до периферії: мікроконтролер працює безпосередньо з вимірними параметрами, а буферна ланка з суперконденсатором приймає на себе короткий енергетичний імпульс, не перевантажуючи основну лінію.

Архітектура при цьому визначається не теоретичною оптимальністю, а часовими обмеженнями. Обмін між вузлами відбувається через прості інтерфейси з мінімальною затримкою; складність протоколу тут менш важлива, ніж швидкість реакції. У змінному режимі саме локальна синхронізація і послідовність виконання задач утримують параметри мережі в допустимих межах (табл. 2).

У локальному сегменті мережі зміна навантаження відчувається миттєво. Шина живлення просідає ще до того, як це фіксується на рівні всієї системи. Мікроконтролер у цей момент не «аналізує архітектуру» – він працює з конкретними значеннями струму і напруги, отриманими через SPI або I2C. Обчислення миттєвої потужності і швидкості її зростання відбувається в циклі, де кожна затримка має значення. Підключення зарядного пристрою або пуск обладнання створює короткий, але різкий імпульс споживання. Якщо реакція запізнюється, то навантаження переходить на основне джерело. У реальній конфігурації сигнал керування надходить на DC-DC перетворювач (рис. 1), а суперконденсатор підхоплює цей імпульс [8]. Це не оптимізація на рівні моделі, а фізичне перерозподілення енергії в межах мілі-

секунд. Вузли обмінюються короткими повідомленнями через UART або SPI. Ніякої складної мережевої логіки – лише стан і часові мітки.

У мікромережі з кількома джерелами саме така взаємодія формує баланс: кожен модуль повідомляє про свій режим і навантаження розподіляється без централізованого «перерахунку». Конфігурація FreeRTOS тут визначає все: порядок задач, пріоритети, допустимі інтервали реакції [1]. У резервних системах телекомунікацій це відчувається буквально: відсутність навіть короткого провалу напруги означає відсутність перезавантаження обладнання.

У системі балансування рахунок іде на мілісекунди. Якщо обробка сигналу затримується, стрибок навантаження вже встигає вплинути на шину живлення. Тому питання не в тому, чи є багатозадачність, а в тому, чи виконається потрібна задача саме тоді, коли це потрібно. FreeRTOS використовується тут не як формальна надбудова, а як інструмент жорсткого розподілу часу.

Задача вимірювання не чекає завершення другорядних обчислень. Обробник перевантаження має вищий пріоритет, ніж фоновий моніторинг. Планувальник визначає порядок, а не випадко-

Таблиця 1

**Функціональні вимоги до систем балансування навантаження в енергомережах Smart Grid**

Функціональна вимога	Технічна реалізація	Значення для балансування навантаження
Моніторинг параметрів мережі	Датчики струму і напруги, мікроконтролери	Своєчасне виявлення змін навантаження
Локальна обробка даних	Обчислення параметрів навантаження на мікроконтролері	Скорочення часу реакції системи
Обмін даними між вузлами	Протоколи I2C, UART, SPI	Координація керувальних впливів
Буферизація енергії	Суперконденсатори і силові перетворювачі	Компенсація пікових навантажень
Керування в реальному часі	FreeRTOS і механізми планування завдань	Забезпечення стабільності роботи
Адаптивне регулювання	Алгоритми керування на мікроконтролері	Підвищення ефективності балансування

Джерело: сформовано автором на основі [1; 2; 3; 6; 9]

Таблиця 2

**Структурно-функціональні компоненти системи динамічного балансування навантаження**

Компонент системи	Функціональне призначення	Технічна реалізація
Сенсорний модуль	Вимірювання електричних параметрів мережі	Датчики струму і напруги, аналогово-цифрові перетворювачі
Мікроконтролерний модуль керування	Обробка даних і формування керувальних сигналів	Мікроконтролери STM32, ESP32, AVR
Модуль накопичення енергії	Буферизація і компенсація пікових навантажень	Суперконденсатори з керованими перетворювачами
Комунікаційний модуль	Передача даних і синхронізація роботи компонентів	Інтерфейси SPI, UART, I2C
Силовий керувальний модуль	Регулювання потоків енергії	DC-DC перетворювачі, електронні ключі
Програмний модуль реального часу	Координація роботи системи	FreeRTOS або інша RTOS

Джерело: сформовано автором на основі [3; 8; 10; 12]

вість. У результаті реакція на зміну режиму не залежить від того, що ще виконується на контролері. Для мікроконтролерної системи принципово що детермінованість стає частиною самої архітектури, а не лише програмною опцією (табл. 3).

У контролері балансування кілька процесів відбуваються одночасно і саме це створює основну складність. Опитування АЦП триває з фіксованим інтервалом, обчислення параметрів навантаження накладається на нього, а формування керувального імпульсу не може чекати завершення фонових процедур. FreeRTOS у цій конфігурації не просто розподіляє задачі, ця операційна система реального часу задає часову дисципліну. Різкий стрибок струму ініціює апаратне переривання, а обробник із вищим пріоритетом витісняє менш критичні процеси. Черги передають вимірювальні

дані без втрат, семафори обмежують доступ до спільних ресурсів. Якщо система налаштована коректно, реакція залишається стабільною навіть тоді, коли загальне обчислювальне навантаження зростає. У контролерах інверторів або автономних енергетичних модулів саме така поведінка визначає чи збережеться напруга в допустимому діапазоні під час різкої зміни режиму [9].

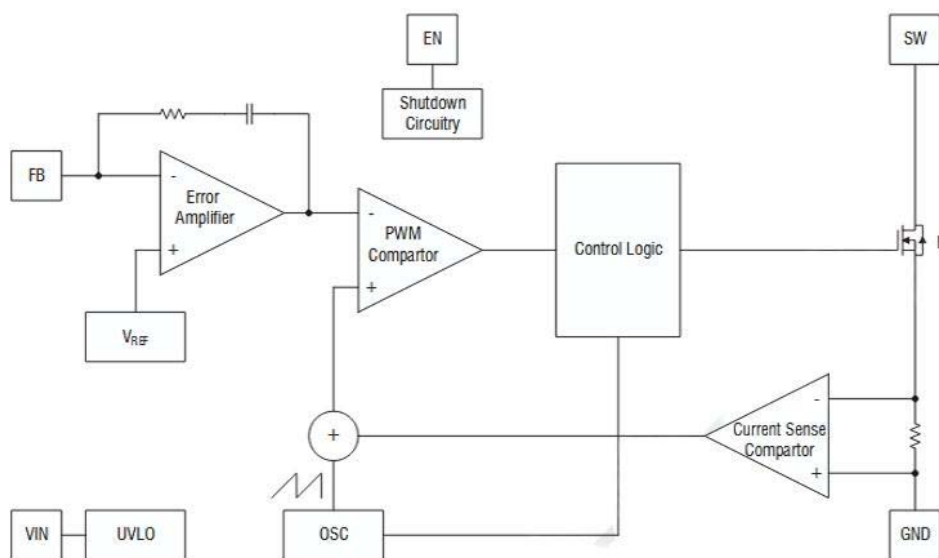
Мікроконтролер у системі балансування не працює в комфортних умовах. Поки він рахує миттєву потужність, у черзі вже накопичуються нові вимірювання. Якщо частоту оновлення підняти занадто високо, процесор починає втрачати темп, але не через складність алгоритму, а через банальний дефіцит часу і пам'яті на ядрі/ядрах процесора. Те, що в моделі виглядає як «оновлення в реальному часі», на платі перетворює-

Таблиця 3

**Механізми FreeRTOS для реалізації керування навантаженням у режимі реального часу**

Механізм FreeRTOS	Функціональне призначення	Значення для керування навантаженням
Планувальник завдань (Scheduler)	Визначення порядку виконання завдань відповідно до пріоритетів	Забезпечує своєчасне виконання критичних керувальних операцій
Завдання (Tasks)	Реалізація окремих функціональних процесів	Дозволяє розділити вимірювання, аналіз і керування
Переривання (Interrupts)	Обробка асинхронних подій	Забезпечує негайну реакцію на зміну параметрів навантаження
Черги (Queues)	Передача даних між завданнями	Забезпечує узгоджений обмін вимірювальною і керувальною інформацією
Семафори і м'ютекси	Синхронізація доступу до ресурсів	Запобігає конфліктам при одночасному виконанні процесів
Таймери реального часу	Формування періодичних подій	Забезпечує регулярне виконання керувальних алгоритмів

Джерело: сформовано автором на основі [1; 3; 10; 13]



**Рис. 1. Функціональна діаграма DC-DC перетворювача MT3608**

Джерело: [14]

ється на конкуренцію за процесорний час. Обмін даними додає ще один рівень напруги. Інтерфейс передає пакет із невеликою затримкою, а оцінка стану вже не може вважатись актуальною [7]. Якщо кілька вузлів реагують асинхронно, їхні керувальні імпульси можуть накладатися. У силовій частині це проявляється перехідними процесами, які не згасають миттєво [3]. Зовні система ніби працює, але в піковий момент запас стійкості зменшується. Навіть програмна багатозадачність не гарантує стабільності, так як один невчасно виконаний обробник переривання – і критична операція може зміститися в часі. У таких умовах стабільність не задається декларативно, її доводиться буквально «виборювати» конфігурацією таймерів, черг і пріоритетів. Запропонований метод динамічного балансування побудований із припущення, що реакція має формуватися там, де виникає дисбаланс, а не на рівні централізованого контролера. Тому керувальний вузол розглядається як замкнений контур: вимірювання, аналіз і регулювання об'єднані в межах одного мікроконтролера. Сенсорні дані струму та напруги надходять через I2C або SPI безпосередньо в обчислювальний модуль. Оцінюється не лише миттєве значення потужності, а й швидкість її зміни. Саме цей параметр визначає момент втручання. Якщо навантаження зростає різко, мікроконтролер формує сигнал для DC-DC перетворювача, а суперконденсатор короткочасно підключається до шини. Буфер працює в імпульсному режимі, згладжуючи провал або перевищення до того, як вони вплинуть на інші вузли. FreeRTOS використовується як механізм часової організації. Задачі

вимірювання, аналізу та формування керувального сигналу мають різні пріоритети, а їх виконання прив'язане до заданих інтервалів. Важливо не саме багатозадачне виконання, а гарантія того, що обробка перевантаження не буде витіснена другорядними процесами. За обмежених ресурсів мікроконтролера саме така конфігурація зберігає детермінованість керування (рис. 2).

Метод реалізується не як окремий модуль «поза системою», а як частина конкретного сегмента. Наприклад, у вузлі живлення автономного об'єкта або в інверторному блоці мікромережі. Мікроконтролер постійно отримує дані про струм і напругу, оскільки режим мережі змінюється, іноді різко. Якщо споживання зростає швидше, ніж основне джерело здатне відреагувати, формується сигнал на DC-DC перетворювач, де суперконденсатор короткочасно підключається до шини. Буфер працює імпульсно: він не замінює джерело живлення, а лише згладжує провал або піковий стрибок. Коли параметри повертаються до робочого діапазону, накопичувач знову переходить у режим заряджання. Уся послідовність – від вимірювання до формування керувального сигналу, – організована через FreeRTOS. Пріоритети задач і часові інтервали задають порядок реакції, де система не чекає завершення другорядних процесів. У такій конфігурації балансування відбувається локально, без передачі запиту на вищий рівень керування. Навантаження на силові компоненти не накопичується в пікові моменти, а напруга не встигає вийти за допустимі межі.

**Висновки.** В умовах швидких змін навантаження реакція централізованого регулювання



Рис. 2. Структура розробленого методу динамічного балансування навантаження

Джерело: власна розробка автора

часто виявляється запізнілою. Перенесення обробки даних і формування керувального сигналу на рівень локального вузла змінює часову структуру процесу: вимірювання, оцінка стану і компенсація відбуваються в одному циклі без передачі рішення на вищий рівень.

Мікроконтролер, суперконденсатор і FreeRTOS утворюють замкнений контур. Сенсорні дані обробляються безпосередньо на платі, короточасні піки навантаження гасяться підключенням буферної ємності через DC-DC перетворювач. Детермінованість забезпечується конфігурацією задач і їх пріоритетів, а не додатковими обчислювальними ресурсами.

Разом із цим обмеження апаратної платформи, затримки комунікації та вимоги до синхронізації між вузлами залишаються критичними факторами. За змінного режиму навіть незначне зміщення у часі впливає на поведінку всієї конфігурації. Тому архітектурні рішення, алгоритмічна оптимізація і організація обміну даними розглядаються як єдиний комплекс.

Подальший розвиток методу може бути пов'язаний із підвищенням адаптивності системи, уточненням механізмів прогнозування навантаження та розширенням масштабованості розподіленої структури.

### Список літератури:

1. Albogamy F. R., Khan S. A., Hafeez G., Murawwat S., Khan S., Haider S. I., Thoben K. D. Real-time energy management and load scheduling with renewable energy integration in smart grid. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, № 3. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14031792>.
2. Albogamy F. R., Paracha M. Y. I., Hafeez G., Khan I., Murawwat S., Rukh G., Khan M. U. A. Real-time scheduling for optimal energy optimization in smart grid integrated with renewable energy sources. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3161845>.
3. Kanellopoulos D., Sharma V. K. Dynamic load balancing techniques in the IoT: A review. *Symmetry*. 2022. Vol. 14, № 12. DOI: <https://doi.org/10.3390/sym14122554>.
4. Grigoraş G., Neagu B. C., Gavrilăş M., Triştiu I., Bulac C. Optimal phase load balancing in low voltage distribution networks using a smart meter data-based algorithm. *Mathematics*. 2020. Vol. 8, № 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/math8040549>.
5. Haghnegahdar L., Chen Y., Wang Y. Enhancing dynamic energy network management using a multiagent cloud-fog structure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 162. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112439>.
6. Yu D., Ma Z., Wang R. Efficient smart grid load balancing via fog and cloud computing. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. Vol. 2022, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/3151249>.
7. Uddoh J., Ajiga D., Okare B. P., Aduloju T. D. Developing AI optimized digital twins for smart grid resource allocation and forecasting. *Journal of Frontiers in Multidisciplinary Research*. 2021. Vol. 2, № 2. URL: <https://doi.org/10.54660/IJFMR.2021.2.2.55-60> (date of access: 05.02.2026).
8. Qureshi K. N., Hussain R., Jeon G. A distributed software defined networking model to improve the scalability and quality of services for flexible green energy internet for smart grid systems. *Computers & Electrical Engineering*. 2020. Vol. 84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106634>.
9. Tushar W., Saha T. K., Yuen C., Smith D., Poor H. V. Peer-to-peer trading in electricity networks: An overview. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2020. Vol. 11, № 4. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.2969657>.
10. Butt O. M., Zulqarnain M., Butt T. M. Recent advancement in smart grid technology: Future prospects in the electrical power network. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021. Vol. 12, № 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.05.004>.
11. Inci M., Çelik Ö., Lashab A., Bayındır K. Ç., Vasquez J. C., Guerrero J. M. Power system integration of electric vehicles: A review on impacts and contributions to the smart grid. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 6. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14062246>.
12. Mazhar T., Shahzad T., Rehman A. U., Hamam H. Integration of smart grid with industry 5.0: applications, challenges and solutions. *Measurement: Energy*. 2025. Vol. 5. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.meae.2024.100031>.
13. Joshan A. Emerging trends and advanced techniques in power system optimization for future smart grids. *Power, Control, and Data Processing Systems*. 2025. Vol. 2, № 2. DOI: 10.30511/pcdp.2025.2060096.1022.
14. MT3608 2A, High Efficiency, 1.2MHz Step-Up Converter. AEROSEMI. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://e2e.ti.com/cfs-file/\\_\\_key/communityserver-discussions-components-files/196/4012002220\\_2D004753D358\\_IC\\_5B00\\_MT3608\\_2C00\\_SMD\\_2C00\\_SOT23\\_2D00\\_6L\\_2C00\\_AEROSEMI\\_5D00\\_.pdf](https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/196/4012002220_2D004753D358_IC_5B00_MT3608_2C00_SMD_2C00_SOT23_2D00_6L_2C00_AEROSEMI_5D00_.pdf) (дата звернення: 15.02.2026).

**Akhmedov M.Sh., Fedorova N.V. DYNAMIC LOAD BALANCING IN REAL TIME AND IMPLEMENTATION CHALLENGES IN SMART GRID ENERGY NETWORKS**

*The article is devoted to solving a scientific and practical problem – increasing the efficiency of load balancing in modern Smart Grid power networks by developing a method of dynamic regulation in real time. The intensive growth of the dynamics of electricity consumption, the emergence of distributed sources of generation and energy storage fundamentally change the nature of the functioning of power systems. It was established that local overloads and short-term imbalances occur much more often than was expected for traditional centralized control schemes, which makes the speed of the system's response a determining factor.*

*The paper analyzes the features of the formation of electrical load and determines the functional requirements for balancing systems based on distributed microcontroller nodes. The transition from centralized models to decentralized control at the peripheral level (edge computing) was substantiated, where decisions are made directly at the point of deviation. The proposed method integrates the use of microcontrollers (STM32, ESP32), energy buffering using supercapacitors and the use of low-level communication protocols (SPI, I2C, UART).*

*Particular attention is paid to the software implementation based on the real-time operating system FreeRTOS. The mechanisms of the task scheduler, interrupt prioritization and the use of queues to ensure deterministic control under conditions of limited computing resources are investigated. The use of supercapacitors in combination with DC-DC converters allows for physical compensation of peak consumption pulses within milliseconds, preventing voltage sags in local network segments. The research results form the basis for the creation of stable, adaptive microgrids capable of maintaining electricity quality without rigid hierarchical coordination.*

**Keywords:** *microcontroller-based control, supercapacitors, embedded systems, real-time operating systems, FreeRTOS, energy buffering, distributed energy systems, deterministic control, low-level communication protocols, system energy efficiency.*

Дата першого надходження статті до видання: 19.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 16.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті 11.05.2026