

УДК 621.3:004.45

DOI: 10.31673/2412-9070.2026.042601

М. Ш. АХМЕДОВ, аспірант;

ORCID: 0009-0000-7291-4328

Н. В. ФЕДОРОВА, д-р техн. наук, професор,

ORCID: 0000-0002-4548-4198

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЕТЕРМІНОВАНOSTІ КЕРУВАННЯ В ЛОКАЛЬНИХ ВУЗЛАХ
ЕНЕРГОМЕРЕЖІ SMART GRID НА БАЗІ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ
РЕАЛЬНОГО ЧАСУ**

Розвиток сучасних інтелектуальних енергомереж Smart Grid вимагає перенесення функцій керування на периферію, що підвищує роль локальних вузлів у зборі та обробці даних у реальному часі. Стабільність енергосистеми залежить від часової передбачуваності (детермінованості) роботи вбудованих контролерів, оскільки навіть незначні затримки можуть спричинити нестабільність режимів роботи мережі. Стаття присвячена вирішенню проблеми забезпечення мілісекундної реакції систем керування в умовах обмежених ресурсів мікроконтролерних платформ.

У роботі використано системний аналіз архітектур кіберфізичних систем та порівняльний аналіз механізмів планування задач у середовищі FreeRTOS. Експериментальна частина базується на моделюванні роботи локального вузла на мікроконтролерній платформі з апаратною фіксацією часових параметрів (латентності, часу відгуку та джитера) у різних режимах навантаження.

Досліджено ключові фактори, що впливають на детермінованість: апаратні обмеження, інтенсивність комунікаційних інтерфейсів (I2C, UART, SPI) та стабільність живлення. Обґрунтовано використання FreeRTOS як інструменту для забезпечення передбачуваної поведінки системи через витісняльне планування, пріоритизацію переривань та механізми синхронізації (черги, семафори, м'ютекси).

В ході експерименту було протестовано чотири режими роботи: базовий, інтенсивний обмін даними, підвищене обчислювальне навантаження та комбінований режим. Встановлено, що навіть у найбільш складному комбінованому режимі час реакції системи залишається у субмілісекундному діапазоні (середній час реакції — 420 мкс), що підтверджує ефективність обраної архітектури. Виявлено, що основними деструктивними факторами є інверсія пріоритетів та конкуренція за апаратні ресурси під час одночасної роботи кількох інтерфейсів.

Доведено, що стабільна часова поведінка досягається через раціональну програмно-апаратну конфігурацію: розмежування задач за критичністю, мінімізацію коду в обробниках переривань (ISR), використання м'ютексів із механізмом успадкування пріоритету та застосування суперконденсаторів для резервування живлення. Запропоновані підходи дозволяють гарантувати дотримання часових дедлайнів у локальних вузлах Smart Grid. Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних алгоритмів керування пріоритетами.

Ключові слова: вбудовані системи керування, часові дедлайни, латентність системи, джитер сигналу, планувальник задач, синхронізація процесів, кіберфізичні енергетичні системи, мікроконтролерні платформи.

Вступ

Сучасний розвиток енергетики характеризується активним впровадженням концепції Smart Grid, що передбачає поступовий перехід від централізованого управління до розподіле-

ного. У такій архітектурі критично важливого значення набувають локальні вузли мережі, які безпосередньо на периферії виконують функції оперативного збору даних, обробки інформації та формування керуючих сигналів. Стабільність всієї енергосистеми в цих умовах залежить не лише від точності алгоритмів балансування, а й від часової передбачуваності роботи вбудованих контролерів.

Постановка проблеми

Розвиток концепції Smart Grid супроводжується поступовим перенесенням частини функцій керування з центрального рівня до локальних вузлів мережі. У таких умовах стабільність енергосистеми визначається не тільки алгоритмами балансування навантаження або регулювання параметрів електроенергії. Не менш важливою стає часова передбачувана робота вбудованих контролерів, які виконують вимірювання, обмін даними та формування керуючих сигналів безпосередньо на периферії мережі. Якщо виконання задач відбувається нерівномірно, а пріоритети переривань або доступ до спільних ресурсів організовано невдало, виникають часові відхилення у вимірюванні й керуванні. Для енергетичних систем навіть незначні зсуви можуть призводити до нестабільності режимів роботи, що підвищує вимоги до детермінованості програмного забезпечення.

Складність посилюється обмеженістю ресурсів мікроконтролерних платформ, які використовуються у локальних вузлах Smart Grid. На практиці один і той самий вузол змушений паралельно підтримувати обмін даними через інтерфейси I2C, UART, USART та SPI, обробляти сигнали сенсорів і водночас формувати керуючі дії для елементів енергетичної інфраструктури. За таких умов застосування операційних систем реального часу, зокрема FreeRTOS, стає майже необхідним, однак саме їх конфігурація значною мірою визначає передбачуваність реакції системи. Розподіл пріоритетів задач, організація взаємодії через черги та семафори, а також параметри роботи планувальника нерідко налаштовуються емпірично. У результаті часові характеристики функціонування вузла залишаються недостатньо формалізованими, що ускладнює гарантування реакції на події у межах мілісекунд.

Отже, проблема детермінованості керування виходить за межі суто програмної оптимізації і набуває системного характеру. Вона пов'язана з розробленням методів до побудови локальних вузлів, здатних стабільно функціонувати в умовах змінних режимів живлення та навантаження. Особливо це проявляється у конфігураціях, де використовуються суперконденсатори або інші буферні джерела енергії, що впливають на динаміку роботи обладнання. Формалізація часових параметрів обробки подій, узгодження механізмів планування задач та оптимізація доступу до ресурсів створюють передумови для підвищення надійності таких вузлів. У ширшому контексті це сприяє формуванню більш стійких кіберфізичних енергетичних систем, у яких локальні елементи здатні підтримувати стабільність мережі без постійної участі центрального керування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд сучасних досліджень свідчить про значну різноманітність методів до пояснення принципів функціонування енергетичних систем Smart Grid та механізмів забезпечення стабільності їх роботи. У науковій літературі ця проблема здебільшого розглядається крізь призму формування кіберфізичних архітектур і інтеграції інформаційних технологій у процеси управління енергетичною інфраструктурою. Так, Ю. В. Костюк та співавтори аналізують архітектуру інтелектуальних систем керування і захисту в середовищі Smart Grid, звертаючи увагу на взаємодію систем автоматизації, інформаційних платформ і механізмів кібербезпеки, що у комплексі впливає на надійність функціонування мережі [1]. Подібну проблематику розглядають і С. П. Денисюк та співавтори, які досліджують особливості реалізації smart-моніторингу під час генерації, передачі та розподілу електроенергії. У їхніх роботах підкреслюється роль цифрових систем збору та аналізу даних у формуванні сучасної моделі управління енергетичними процесами [2]. В іншій праці С. П. Денисюк та співавтори зосереджують увагу на методах моніторингу ефективності локальних електроенергетичних систем, де комплексна оцінка режимів роботи дозволяє своєчасно виявляти відхилення та підтримувати стабільність функціонування енергетичних об'єктів [3].

Інший спектр досліджень пов'язаний із розвитком комунікаційної інфраструктури Smart Grid, оскільки саме передавання даних і синхронізація інформаційних потоків визначають узгодженість роботи елементів енергосистеми. М. Стаднік та співавтори обґрунтовують доцільність використання інтелектуальних систем аналізу даних для підвищення надійності електроенергетичних мереж, наголошуючи на важливості цифрових технологій обробки інформації у процесах управління енергетичною інфраструктурою [4]. У дослідженні Б. Ху (B. Hu) та Х. Гараві (H. Gharavi) запропоновано концепцію гібридної дротово-бездротової детермінованої мережі для Smart Grid, яка поєднує різні канали зв'язку та забезпечує більш передбачуване передавання даних між компонентами системи [5]. А. Белфкіх (A. Belfqih) розглядає можливості децентралізованого керування розподільними мережами з використанням технологій Інтернету речей, де сенсорні вузли виконують роль джерел оперативної інформації для прийняття управлінських рішень [6]. Дещо інший аспект порушують Й. Пенг (Y. Peng) та співавтори, які пропонують механізм детермінованого планування задач у промислових кіберфізичних системах енергетичного інтернету, спрямований на підвищення передбачуваності часових характеристик процесів керування [7].

Помітний напрям сучасних досліджень стосується алгоритмічних методів до управління енергетичними системами та координації інформаційних потоків у складних мережевих структурах. С. Янг (X. Yang) та співавтори досліджують створення інтегрованої системи мережевого керування розподільними мережами на базі платформи операційного контролю енергосистеми, що дозволяє узгоджувати роботу різних компонентів енергетичної інфраструктури [8]. С. Сяо (C. Xiao) та співавтори пропонують data-driven метод до керування системами накопичення енергії у віртуальних електростанціях, орієнтований на оптимізацію використання ресурсів у режимі реального часу [9]. У дослідженні Дж. Ісерн (J. Isern) та співавторів представлено кіберфізичну систему дистанційного керування та захисту критичної інфраструктури Smart Grid, що поєднує сенсорні мережі, аналітичні алгоритми та автоматизовані засоби управління [10]. Л. Ф. Ф. де Алмейда (L. F. F. De Almeida) та співавтори розглядають контрольні мережі й системи телезахисту Smart Grid, визначаючи технології та протоколи, які забезпечують координацію процесів керування у складних енергетичних системах [11].

Окремий дослідницький вектор сформувався навколо застосування методів машинного навчання та інтелектуальної аналітики для підвищення ефективності функціонування енергомереж. Р. Ян (R. Yan) та співавтори пропонують модель децентралізованого volt/var-керування на основі багатоагентного графового навчання з підкріпленням, що дає змогу оптимізувати роботу фотоелектричних інверторів у розподільних мережах [12]. У роботі Л. Мін (L. Min) та співавторів запропоновано стохастичний метод на основі машинного навчання, спрямований на підвищення спостережуваності автоматизованих енергетичних мереж і покращення аналізу режимів їх функціонування [13]. С. Рубіо (S. Rubio) та співавтори узагальнюють сучасні виклики розвитку систем захисту, автоматизації та керування Smart Grid, підкреслюючи необхідність інтеграції аналітичних інструментів у процеси управління енергетичною інфраструктурою [14]. У дослідженні А. Р. Сінгх (A. R. Singh) та співавторів запропоновано інтелектуальну архітектуру на основі глибокого навчання та технологій Інтернету речей для адаптивного розподілу ресурсів у енергетичних системах реального часу [15].

Попри значний обсяг наукових робіт, проблема часової детермінованості локальних вузлів Smart Grid на мікроконтролерних платформах залишається висвітленою фрагментарно. У більшості досліджень основну увагу приділено архітектурі мереж, алгоритмам оптимізації або аналітиці даних, тоді як внутрішні механізми функціонування вузлів реального часу розглядаються лише поверхнево. Зокрема, недостатньо досліджено взаємодію планувальників задач, механізмів пріоритизації переривань і засобів синхронізації під час роботи з інтенсивними потоками даних через комунікаційні інтерфейси. Обмежено представлені й експериментальні результати, що дозволяють оцінити латентність, час реакції або джитер системи в умовах різних режимів навантаження та змінних енергетичних параметрів.

У зв'язку з цим запропоноване дослідження зосереджене на аналізі програмно-апаратних механізмів забезпечення детермінованості у локальних вузлах Smart Grid. Особливу увагу приділено механізмам планування та синхронізації задач у FreeRTOS, а також експеримента-

льній перевірці часових характеристик системи на базі мікроконтролерної платформи. Проведені вимірювання дозволили уточнити вплив різних конфігурацій планувальника і механізмів взаємодії задач на стабільність роботи вузла. Отримані результати стали підставою для формування рекомендацій щодо програмно-апаратної конфігурації систем керування, орієнтованих на дотримання часових дедлайнів і підвищення надійності функціонування енергомережі в режимі реального часу.

Мета і задачі дослідження

Метою статті є теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка механізмів забезпечення детермінованості керування в локальних вузлах енергомереж Smart Grid на базі мікроконтролерів і операційної системи реального часу FreeRTOS.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Дослідити вимоги до часової детермінованості локальних вузлів Smart Grid з урахуванням обмежених ресурсів мікроконтролерів, особливостей низькорівневих протоколів обміну даними та впливу енергетичних факторів.
2. Проаналізувати механізми планування задач, пріоритизації переривань і міжзадачної взаємодії у FreeRTOS та експериментально оцінити часові характеристики системи (час відгуку, латентність, джитер) у різних режимах навантаження.
3. Виявити проблеми забезпечення детермінованості та обґрунтувати рекомендації щодо програмно-апаратної конфігурації локальних вузлів Smart Grid для гарантованого дотримання часових дедлайнів.

Результати дослідження

Функціонування локальних вузлів енергомереж Smart Grid пов'язане з поєднанням вимірювальних, обчислювальних і комунікаційних процесів у межах кіберфізичної системи. Мікроконтролер у такому вузлі виконує кілька задач одночасно: приймає дані із сенсорів, обробляє сигнали, передає інформацію іншим елементам мережі та формує керуючі дії. Робота відбувається у режимі реального часу, тому важливою стає передбачуваність виконання задач, а не лише правильність алгоритмів. Часові характеристики роботи вузла залежать від кількох чинників. Значення мають апаратні обмеження мікроконтролера, інтенсивність обміну даними через інтерфейси I2C, UART, USART і SPI, а також особливості організації програмних процесів. За значного навантаження навіть незначні затримки можуть змінювати послідовність обробки подій і впливати на формування керуючих сигналів. Окрему роль відіграє стабільність живлення. У практичних умовах застосовують суперконденсатори, які короткочасно підтримують роботу вузла під час провалів напруги або імпульсних навантажень. Основні фактори, що впливають на часові характеристики функціонування локального вузла, узагальнено у табл. 1.

Таблиця 1

Ключові фактори забезпечення часової детермінованості локальних вузлів Smart Grid

Фактор системи	Технологічна реалізація	Вплив на часову детермінованість	Практичне значення
Обчислювальна платформа	Мікроконтролери з обмеженими ресурсами пам'яті та частоти	Обмежує кількість паралельних задач і швидкість їх виконання	Визначає необхідність оптимізації програмної архітектури
Комунікаційні інтерфейси	I2C, UART, USART, SPI	Генерують переривання та навантаження на шину даних	Впливають на латентність передачі та синхронізацію даних
Система переривань	Апаратні контролери переривань мікроконтролера	Формує пріоритетність обробки подій	Забезпечує своєчасну реакцію на критичні сигнали

Енергетична стабільність	Суперконденсатори як буфер живлення	Підтримує роботу системи під час короточасних провалів напруги	Дас змогу завершити критичні операції без втрати даних
Архітектура програмного забезпечення	Система реального часу та механізми планування задач	Забезпечує контрольоване виконання процесів у задані часові інтервали	Підвищує стабільність функціонування локального вузла

У реальних Smart Grid інфраструктурах зазначені фактори безпосередньо впливають на стабільність роботи локальних модулів, які виконують функції розподіленого керування. У системах моніторингу стану мережі мікроконтролер отримує дані від датчиків струму і напруги через інтерфейси I2C або SPI, виконує первинну обробку сигналів і передає результати через UART або інший канал зв'язку до центрального контролера або енергетичного шлюзу [4]. За такої організації навіть короткі затримки у виконанні задач можуть спричинити накопичення похибок вимірювання або втрату синхронізації між вузлами, що ускладнює балансування навантаження.

Практично детермінованість досягається поєднанням апаратних і програмних механізмів. Переривання забезпечують швидку реакцію на події, а планування задач розподіляє ресурси між процесами збору даних, обробки сигналів і передавання інформації. У локальних контролерах мікромереж вимірювальні задачі можуть виконуватися з періодом кілька мілісекунд, тоді як передавання телеметрії має нижчий пріоритет і виконується рідше [7]. Така ієрархія дозволяє системі реагувати передусім на критичні зміни параметрів мережі.

Додаткову надійність забезпечують суперконденсатори, які використовуються для короточасного резервування живлення. Під час провалу напруги вони підтримують роботу мікроконтролера протягом десятків або сотень мілісекунд - часу, достатнього для завершення обчислень або передавання аварійного повідомлення. У системах керування розподіленою генерацією або зарядними станціями електромобілів це дозволяє уникнути втрати телеметричних даних. У підсумку детермінованість роботи локального вузла формується сукупною дією мікроконтролерної архітектури, комунікаційних інтерфейсів, системи переривань і засобів енергетичної стабілізації.

Мілісекундна реакція у вбудованих системах керування значною мірою залежить від організації програмної взаємодії між задачами та апаратними подіями. У середовищі FreeRTOS передбачуваність виконання забезпечується витісняльним плануванням, ієрархією пріоритетів і механізмами синхронізації, що розділяють обробку подій між обробниками переривань і задачами користувацького рівня [1]. Важливо мінімізувати час виконання критичних ділянок коду та організувати передавання подій так, щоб ключові процеси не залежали від другорядних обчислень (табл. 2).

Таблиця 2

Механізми FreeRTOS, що забезпечують детермінованість виконання задач

Механізм	Призначення	Вплив на часову поведінку системи
Витісняльний планувальник	Передача процесора задачі з вищим пріоритетом	Скорочує час реакції на критичні події
Пріоритети переривань	Ієрархічна обробка апаратних сигналів	Забезпечує швидку реакцію на зовнішні події
Черги	Передача даних між задачами або з ISR	Упорядковує обмін подіями
Семафори	Сигналізація про виникнення події	Дозволяє оперативно активувати потрібну задачу
М'ютекси	Синхронізація доступу до спільних ресурсів	Запобігає конфліктам і блокуванням задач

Практична значущість описаних механізмів проявляється у реальних інженерних рішеннях, де необхідно забезпечити передбачувану реакцію системи на зміну параметрів енергомережі. У локальних контролерах розподіленої генерації мікроконтролер періодично отримує дані від модулів вимірювання струму та напруги через інтерфейси SPI або I2C [10]. Після завершення обміну периферійний модуль генерує переривання, що сигналізує про появу нових вимірювань. Якщо виконувати обробку безпосередньо в обробнику переривання, зростає ризик блокування інших подій. Тому у практичних реалізаціях ISR лише фіксує подію та передає її через чергу або семафор до відповідної задачі.

Така організація дозволяє розмежувати функції системи. Задачі з високим пріоритетом виконують обчислення миттєвих параметрів мережі або перевірку порогових значень, тоді як задачі нижчого рівня обробляють допоміжні процеси - передавання телеметрії, запис даних у пам'ять або діагностику [11]. За одночасного виконання кількох операцій система зберігає передбачувану часову поведінку, оскільки планувальник FreeRTOS надає процесорний час передусім критичним задачам.

Не менш важливими є засоби синхронізації. У системах енергетичного моніторингу кілька задач можуть звертатися до спільних структур даних, що містять результати вимірювань або інформацію про стан обладнання [9]. За відсутності контролю доступу можливі конфлікти або спотворення даних. Використання м'ютексів і подібних механізмів дозволяє узгодити роботу задач і зберегти коректність інформації. У підсумку поєднання витісняльного планування, правильно організованих переривань і контрольованої взаємодії задач формує основу детермінованої роботи локальних вузлів Smart Grid у режимі реального часу.

Для узагальнення логіки взаємодії між апаратними подіями, механізмами синхронізації та задачами керування у середовищі FreeRTOS доцільно подати послідовність обробки події в локальному вузлі Smart Grid у вигляді покрокової схеми. Така візуалізація дозволяє наочно відобразити розмежування функцій між обробником переривання та задачами користувачького рівня, а також показати, яким чином формується детермінована реакція системи на зовнішній сигнал (рис. 1).



Рис. 1. Послідовність обробки події у локальному вузлі Smart Grid на базі FreeRTOS

Рис. 1 відображає принципову організацію детермінованого керування у локальному вузлі Smart Grid, за якої найбільш критичні за часом операції виконуються у чітко розмежованих програмних рівнях. Обробник переривання виконує лише мінімально необхідні дії, не перевантажуючи процесор тривалими обчисленнями, тоді як основна логіка аналізу даних і формування керуючого рішення переноситься до задачі з відповідним пріоритетом. Саме такий ме-

тод дає змогу скоротити латентність реакції та зменшити варіативність часових параметрів системи. Так, узгодження переривань, черг, семафорів і пріоритетів задач забезпечує своєчасне реагування на події енергомережі та створює основу для стабільного функціонування локального вузла в режимі реального часу.

Експериментальна модель локального вузла Smart Grid у цьому дослідженні використовується для перевірки часових характеристик програмно-апаратної архітектури системи керування. Її завдання - з'ясувати, чи забезпечує мікроконтролерна платформа під керуванням операційної системи реального часу передбачуваний час реакції за різного навантаження. Як основу використано мікроконтролерну плату з інтерфейсами обміну даними, на якій розгорнуто FreeRTOS із витісняльним плануванням задач.

Архітектура моделі відтворює типову логіку роботи локального вузла енергомережі: надходження сигналу від периферійного пристрою через інтерфейс обміну, фіксацію події переривання та передавання її до керуючої задачі, яка виконує обчислення і формує керуючий сигнал. Для наближення до реальних умов у систему введено фонові задачі телеметрії та обробки даних, що створюють додаткове навантаження на процесор і комунікаційні шини.

Часові параметри визначаються апаратною фіксацією моментів виникнення події та початку виконання керуючої задачі. Для цього використовуються сигнали на виводах мікроконтролера, що дозволяє виміряти інтервал між перериванням і початком обробки події. Такий метод дає змогу оцінити латентність системи, повний час реакції та коливання цих параметрів у різних режимах навантаження. Експеримент проведено у кількох режимах, що відтворюють типові сценарії функціонування локального вузла Smart Grid: базовому, режимі інтенсивного обміну даними, режимі підвищених обчислювальних задач і комбінованому режимі (табл. 3).

Таблиця 3

**Результати вимірювання часових характеристик експериментальної моделі
локального вузла Smart Grid**

Режим роботи	Середня латентність ISR→задача (мкс)	Максимальна латентність (мкс)	Середній час реакції системи (мкс)	Джитер (мкс)
Базовий режим	95	180	240	60
Інтенсивний обмін даними	140	320	310	110
Підвищене обчислювальне навантаження	155	410	335	140
Комбінований режим	210	760	420	260

Отримані результати показують, що навіть зі зростанням навантаження система зберігає передбачувану часову поведінку. У базовому режимі час реакції становить частки мілісекунди, що підтверджує ефективність витісняльного планування та механізмів синхронізації FreeRTOS. Зі збільшенням комунікаційної активності або кількості фонових задач латентність зростає поступово, без різких коливань. Навіть у комбінованому режимі, найбільш наближеному до реальних умов роботи енергетичних вузлів, час реакції залишається у субмілісекундному діапазоні. Це підтверджує можливість використання подібної програмно-апаратної архітектури в локальних системах керування Smart Grid.

Водночас результати експерименту показують, що детермінованість керування залежить від сукупності програмних і апаратних чинників. Навіть за використання операційної системи реального часу часові характеристики змінюються під впливом взаємодії задач, периферійних інтерфейсів та умов живлення. Однією з типових проблем є інверсія пріоритетів, яка виникає під час доступу задач до спільних ресурсів. Якщо задача з нижчим пріоритетом утримує ресурс, необхідний для виконання більш критичної задачі, виникають затримки у керуючому контурі та збільшується латентність.

Помітний вплив має і конкуренція за апаратні ресурси мікроконтролера. Інтенсивний обмін даними через комунікаційні інтерфейси збільшує кількість переривань і навантаження на шини передачі, що може уповільнювати виконання критичних задач [5]. У ході експерименту спостерігалось, що одночасна робота кількох периферійних модулів підвищує нерівномірність обробки подій, оскільки процесор розподіляє ресурси між комунікаційними операціями та керуючими алгоритмами. Додаткові труднощі виникають у разі перевантаження обробників переривань: якщо вони містять значний обсяг обчислень, затримується передавання керування задачам і зростає варіація часу реакції.

Певний вплив мають також особливості комунікаційних протоколів і режими їх роботи. Низькорівневі інтерфейси мають власні механізми передачі та буферизації, що іноді не узгоджуються з періодичністю задач реального часу. У результаті навантаження на процесор стає нерівномірним, а час обробки даних варіюється. Окремим фактором є нестабільність живлення: навіть за використання суперконденсаторів можливі короткі затримки у відновленні роботи периферійних модулів або повторній синхронізації задач.

Таким чином, ключовими проблемами забезпечення детермінованості залишаються інверсія пріоритетів під час доступу до ресурсів, перевантаження системи переривань у режимах інтенсивної комунікації, нерівномірне використання обчислювальних ресурсів і вплив нестабільності живлення на роботу периферійних модулів. Урахування цих чинників є необхідною умовою підвищення стабільності локальних вузлів енергомереж Smart Grid.

Для більш наочного представлення отриманих результатів доцільно проаналізувати зміну часових характеристик системи залежно від режиму навантаження. Візуалізація дозволяє оцінити тенденції зростання латентності та часу реакції, а також виявити ступінь варіативності цих параметрів у різних умовах функціонування локального вузла Smart Grid. Узагальнені результати подано на рис. 2.

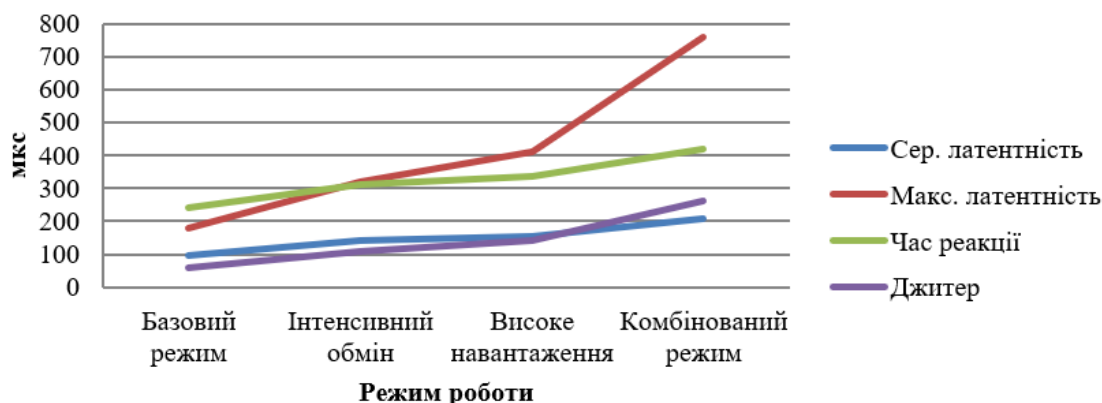


Рис. 2. Залежність часових характеристик (латентність, час реакції, джитер) від режиму навантаження локального вузла Smart Grid

Графічне представлення результатів підтверджує наявність чіткої тенденції до зростання часових затримок із підвищенням рівня навантаження. Найбільш інтенсивне збільшення спостерігається у комбінованому режимі, що поєднує обчислювальні та комунікаційні процеси, де середній час реакції та джитер досягають максимальних значень. Водночас характер кривих свідчить про відсутність різких стрибків або хаотичних змін параметрів, що підтверджує збереження керованості та передбачуваності системи навіть у складних умовах функціонування.

Аналіз графіка дозволяє зробити висновок, що основним фактором погіршення часових характеристик є не сам факт зростання навантаження, а його комбінований характер, який призводить до конкуренції за ресурси між обчислювальними задачами та процесами обміну даними. Це узгоджується з експериментальними спостереженнями щодо впливу переривань і взаємодії задач на детермінованість системи та підкреслює необхідність оптимізації пріоритетів і механізмів синхронізації у FreeRTOS.

Отримані результати дозволяють окреслити практичні методи до конфігурації локального вузла Smart Grid. Забезпечення детермінованості має базуватися на узгодженні програмної архітектури з апаратними можливостями мікроконтролера та особливостями взаємодії з пери-

ферійними пристроями. Доцільно розмежовувати задачі за рівнем критичності, виділяючи керуючі процеси реального часу з найвищим пріоритетом і відокремлюючи їх від фонових операцій обробки даних або передачі інформації.

Практична конфігурація системи передбачає мінімізацію обчислень у обробниках переривань і передавання подій до задач користувачького рівня через механізми синхронізації FreeRTOS. Це скорочує час виконання переривань і зменшує варіацію часу реакції навіть у режимах активного обміну даними. Важливим є також контроль доступу до спільних ресурсів: використання м'ютексів із механізмом успадкування пріоритету дозволяє знизити ризик інверсії пріоритетів.

Зменшення впливу комунікаційних процесів досягається ізоляцією операцій обміну даними в окремих задачах середнього або нижчого пріоритету та використанням буферизації для вирівнювання навантаження на шини передачі. Додаткову стабільність забезпечує застосування суперконденсаторів у системі живлення, що дає змогу підтримувати роботу вузла під час короточасних провалів напруги та завершувати критичні операції без втрати даних. Сукупність цих програмних і апаратних рішень формує основу детермінованої роботи локального вузла Smart Grid і сприяє підвищенню надійності функціонування енергомережі в режимі реального часу.

Висновки та перспективи подальших досліджень

У результаті дослідження розв'язано наукове завдання, що полягає в обґрунтуванні методів до забезпечення детермінованості керування в локальних вузлах енергомережі Smart Grid на базі мікроконтролерних платформ із використанням операційних систем реального часу. Встановлено, що стабільність роботи таких вузлів визначається здатністю програмно-апаратної системи забезпечувати передбачуваний час реакції на події та дотримання часових обмежень керування.

Показано, що застосування FreeRTOS у поєднанні з витісняльним плануванням задач, коректною пріоритизацією переривань і механізмами міжзадачної синхронізації дозволяє стабілізувати часові характеристики системи та підтримувати реакцію в мілісекундному масштабі навіть за умов комунікаційного й обчислювального навантаження. Експеримент на мікроконтролерній платформі підтвердив, що вирішальне значення має організація взаємодії між обробниками переривань і задачами керування. Передавання подій через черги, семафори та використання механізмів взаємного виключення зменшує латентність і обмежує коливання часу реакції.

Водночас встановлено, що детермінованість може порушуватися через інверсію пріоритетів, конкуренцію за апаратні ресурси, інтенсивну роботу комунікаційних інтерфейсів та нестабільність живлення, що проявляється у зростанні латентності та джитера. Для зменшення цих ефектів запропоновано методи до програмно-апаратної конфігурації локальних вузлів Smart Grid: розмежування задач за рівнем критичності, мінімізацію обчислень у обробниках переривань, використання механізмів синхронізації з успадкуванням пріоритетів, ізоляцію комунікаційних процесів у окремих задачах та застосування суперконденсаторів для підвищення енергетичної стійкості вузла.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням адаптивних методів керування пріоритетами задач, оптимізацією обміну даними між периферійними модулями та створенням більш стійких програмно-апаратних архітектур локальних вузлів інтелектуальних енергомереж.

Внесок авторів

Магомед АХМЕДОВ – збір і перевірка емпіричних даних, емпіричне дослідження, аналіз джерел, підготовка огляду літератури; Наталія ФЕДОРОВА – концептуалізація, методика.

Декларація про штучний інтелект

Штучний інтелект не використовувався.

Конфлікт інтересів

Конфлікт інтересів відсутній. Підтверджуємо, що під час підготовки цієї роботи не існувало жодних комерційних, фінансових або інших взаємовідносин, які могли б бути розцінені як такі, що здатні вплинути на результати дослідження або їх інтерпретацію. Робота виконана відповідно до принципів академічної доброчесності, етичних норм проведення наукових досліджень та вимог редакційної політики щодо запобігання конфлікту інтересів.

Список використаної літератури

1. Kostiuk, Y., Skladannyi, P., Rzaeva, S., Samoilenko, Y., & Korshun, N. (2025). *Intelligent control and security systems in cyber-physical and cloud environments of smart grid*. *Cybersecurity: Education, Science, Technique*, 2(30), 125–156. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.956>
2. Denysiuk, S., Sopel, M., & Bielokha, H. (2025). *Features of implementation of smart-monitoring in electricity generation, transmission and distribution*. *POWER ENGINEERING: Economics, Technique, Ecology*, (2). <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2025.327373>
3. Denysiuk, S., Bielokha, H., Hilevich, K., & Cherneshchuk, I. (2024). *Monitoring of the efficiency in local electricity systems*. *Praci Institutu Elektrodinamiki Nacionalaµmoi Akademii Nauk Ukraini*, 2024(69), 46–55. <https://doi.org/10.15407/publishing2024.69.046>
4. Стаднік, М., Штуць, А., Колісник, М., & Григоренко, Н. (2025). *Застосування інтелектуальних систем для підвищення надійності та ефективності функціонування електроенергетичних мереж*. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 347(1), 291–299. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-38>
5. Hu, B., & Gharavi, H. (2021). *A hybrid wired/wireless deterministic network for smart grid*. *IEEE Wireless Communications*, 28(3), 138–143. <https://doi.org/10.1109/mwc.001.2000493>
6. Lekbich, A., Belfqih, A., Zedak, C., Boukherouaa, J., & Elmariami, F. (2021). *Implementation of a decentralized real-time management system for electrical distribution networks using the internet of things in smart grids*. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(3), 1142–1153. <https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.2436>
7. Singh, A. R., Sujatha, M. S., Kadu, A. D., Bajaj, M., Addis, H. K., & Sarada, K. (2025). *A deep learning and IoT-driven framework for real-time adaptive resource allocation and grid optimization in smart energy systems*. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-02649-w>
8. Peng, Y., Jolfaei, A., & Yu, K. (2021). *A novel real-time deterministic scheduling mechanism in industrial cyber-physical systems for energy internet*. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1. <https://doi.org/10.1109/tii.2021.3139357>
9. Yang, X., Jia, K., & Peng, Z. (2024). *Construction of integrated network order system of main distribution network based on power grid operation control platform*. *Energy Informatics*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00368-6>
10. Xiao, C., Sutanto, D., Muttaqi, K. M., & Zhang, M. (2020). *Multi-period data driven control strategy for real-time management of energy storages in virtual power plants integrated with power grid*. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 118, 105747. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.105747>
11. Isern, J., Jimenez-Perera, G., Medina-Valdes, L., Chaves, P., Pampliega, D., Ramos, F., & Barranco, F. (2023). *A cyber-physical system for integrated remote control and protection of smart grid critical infrastructures*. *Journal of Signal Processing Systems*. <https://doi.org/10.1007/s11265-023-01842-2>
12. De Almeida, L. F. F., Santos, J. R. D., Pereira, L. A. M., Sodre, A. C., Mendes, L. L., Rodrigues, J. J. P. C., Rabelo, R. A. L., & Alberti, A. M. (2020). *Control networks and smart grid teleprotection: Key aspects, technologies, protocols, and case-studies*. *IEEE Access*, 8, 174049–174079. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3025235>
13. Yan, R., Xing, Q., & Xu, Y. (2023). *Multi agent safe graph reinforcement learning for PV inverter s based real-time de centralized volt/var control in zoned distribution networks*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1. <https://doi.org/10.1109/tsg.2023.3277087>
14. Min, L., Alnowibet, K. A., Alrasheedi, A. F., Moazzen, F., Awwad, E. M., & Mohamed, M. A. (2021). *A stochastic machine learning based approach for observability enhancement of automated smart grids*. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103071. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103071>

15. Rubio, S., Bogarra, S., Nunes, M., & Gomez, X. (2025). Smart grid protection, automation and control: Challenges and opportunities. *Applied Sciences*, 15(6), 3186. <https://doi.org/10.3390/app15063186>

M. Akhmedov, N. Fedorova

ENSURING DETERMINISTIC CONTROL IN LOCAL SMART GRID NODES BASED ON REAL-TIME OPERATING SYSTEMS

The evolution of modern Smart Grid intelligent power systems requires the delegation of control functions to the network edge, increasing the significance of local nodes in real-time data acquisition and processing. The stability of the power grid depends on the temporal predictability (determinism) of embedded controllers, as even minor delays can lead to instability in power system operating modes. This article addresses the problem of ensuring millisecond-scale response in control systems under the constraints of limited microcontroller platform resources.

The study employs system analysis of cyber-physical system architectures and a comparative analysis of task scheduling mechanisms within the FreeRTOS environment. The experimental part is based on modeling a local node's operation on a microcontroller platform with hardware-based tracing of timing parameters (latency, response time, and jitter) across various load conditions.

The key factors affecting determinism were investigated: hardware limitations, the intensity of communication interfaces (I2C, UART, SPI), and power stability. The use of FreeRTOS as a tool to ensure predictable system behavior through preemptive scheduling, interrupt prioritization, and synchronization mechanisms (queues, semaphores, mutexes) is substantiated.

During the experiment, four operational modes were tested: basic, intensive data exchange, high computational load, and a combined mode. It was established that even in the most complex combined mode, the system response time remains within the sub-millisecond range (average response time of 420 μ s), confirming the effectiveness of the chosen architecture. The study identified that the primary destructive factors are priority inversion and competition for hardware resources during the simultaneous operation of multiple interfaces.

It has been proven that stable timing behavior is achieved through rational software-hardware configuration: separating tasks by criticality, minimizing code in interrupt service routines (ISR), using mutexes with priority inheritance mechanisms, and employing supercapacitors for power redundancy. The proposed approaches guarantee compliance with timing deadlines in local Smart Grid nodes. Prospects for further research involve the development of adaptive priority management algorithms.

Keywords: embedded control systems, timing deadlines, system latency, signal jitter, task scheduler, process synchronization, cyber-physical energy systems, microcontroller platforms.

Надійшла до редакції: 01.07.2026

Прийнята до друку: 15.07.2026

Опубліковано: 17.08.2026

© 2026 Ахмедов М. Ш., Федорова Н. В.

Цей матеріал ліцензовано за умовами CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>