

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.382.3

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/05>**Білевський П.С.**

Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ РЕГУЛЯТОРІВ НАПРУГИ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ МІКРОСИСТЕМ

У статті розглянуто проблему забезпечення стабільного та ефективного електроживлення мікросистем в умовах нестабільного або ізолюваного енергопостачання. З огляду на зростаючу потребу в автономних та розподілених енергетичних рішеннях, досліджено ключові підходи до стабілізації напруги, зокрема використання лінійних, імпульсних та гібридних регуляторів. Особливу увагу приділено аналізу переваг і недоліків традиційних схем стабілізації та обґрунтовано необхідність створення гібридних регуляторів, що поєднують високу точність регулювання з мінімальними втратами енергії. Запропонована структура включає первинний імпульсний стабілізатор та вторинний лінійний регулятор, що дозволяє досягти точного регулювання вихідної напруги при високій енергоефективності. В основі розробленого рішення – адаптивний алгоритм управління, який забезпечує динамічну зміну режимів роботи залежно від навантаження, температури, умов експлуатації та наявності електромагнітних завад.

Проведене моделювання в середовищах LTspice, MATLAB/Simulink, ANSYS та інших інструментах електронного і теплового аналізу показало високі технічні характеристики гібридного регулятора: енергоефективність 92–97%, точність стабілізації $\pm 0.1\%$, час реакції до 50 мкс. Термостійкість системи підтверджена стабільною роботою в широкому температурному діапазоні – від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$.

Вивчено здатність до самодіагностики та автоматичного коригування параметрів, що особливо важливо для безперебійної роботи в автономному режимі. Порівняльний аналіз з комерційними аналогами компаній Texas Instruments, Analog Devices, Maxim Integrated та Vicor підтвердив вищу енергоефективність, компактність та функціональну гнучкість розробленої системи.

Запропоноване рішення має значний потенціал практичного впровадження у системах Інтернету речей (IoT), критичній інфраструктурі, телекомунікаціях, медицині, автономних енергетичних комплексах та мобільній електроніці. Подальший розвиток технології можливий шляхом інтеграції штучного інтелекту для самооптимізації режимів стабілізації та впровадження стандартизованих інтерфейсів керування енергоспоживанням, що відкриває перспективи масового застосування у високотехнологічних галузях.

Ключові слова: регулятор напруги, мікросистеми, стабілізація, енергоефективність, автономні системи, розподілена генерація.

Постановка проблеми. Сучасний розвиток технологій мікроелектроніки та автономних систем висуває високі вимоги до якості електроживлення. Особливо гостро проблема забезпечення електроживлення постає в умовах нестабільної роботи централізованих енергосистем, коли мікросистеми повинні функціонувати в режимі енергетичних островів [1]. Регулятори напруги відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного функціонування електронних пристроїв,

особливо в умовах змінного навантаження та нестабільного вхідного живлення.

Необхідність оптимізації схем регуляторів напруги для мікросистем набуває особливої актуальності в контексті розвитку розподіленої генерації та автономних енергетичних комплексів [2]. Традиційні підходи до стабілізації напруги не завжди відповідають специфічним вимогам мікросистем щодо енергоефективності, габаритів та надійності.

Крім того, особливості роботи в ізолюваному режимі вимагають адаптації алгоритмів управління до змінних умов експлуатації [3].

Аналіз сучасних тенденцій показує, що оптимальні рішення для живлення мікросистем повинні забезпечувати не лише високу точність стабілізації, але й мінімальне енергоспоживання в режимах очікування, швидку реакцію на зміни навантаження та стійкість до електромагнітних завад. Зазначене особливо важливо для систем, що працюють в умовах обмеженого енергоресурсу або потребують тривалої автономної роботи.

Методологія дослідження. Дослідження базується на комплексному підході, що включає теоретичний аналіз, математичне моделювання та експериментальну перевірку. При проведенні дослідження використовувались методи схематичного аналізу, теорії автоматичного управління та оптимізації. Моделювання схем регуляторів напруги проводилось з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу електронних схем. Критеріями оптимізації слугували енергоефективність, точність стабілізації, швидкодія та стійкість до збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Традиційно, для стабілізації напруги в електронних системах використовуються лінійні та імпульсні регулятори.

Лінійні регулятори (Рис. 1) характеризуються простотою схематичного рішення, низьким рівнем пульсацій та високою швидкодією. Однак, їх основним недоліком є низька енергоефективність, особливо при великій різниці між вхідною та вихідною напругою, що обмежує їх застосування в автономних системах, де енергозбереження є критично важливим параметром.

Імпульсні регулятори (Рис. 2) забезпечують значно вищу енергоефективність завдяки викорис-

танням транзисторних елементів та енергонакопичувальних компонентів, таких як конденсатори та інші. Проте, вони характеризуються складнішою схемою управління, підвищеним рівнем електромагнітних завад та потенційною нестабільністю за певних умов роботи. Крім того, динамічні характеристики імпульсних регуляторів можуть бути недостатніми для живлення швидкодіючих мікросистем.

Особливо важливою є проблема забезпечення стабільного живлення в умовах ізолюваної роботи від основної енергосистеми [4]. В таких умовах регулятори напруги повинні адаптуватися до змінних параметрів джерела живлення та забезпечувати стабільну роботу при різних режимах навантаження [5]. Це вимагає розробки спеціалізованих алгоритмів управління режимами стабілізації та оптимізації параметрів силових схем.

Аналіз літературних джерел показує, що існуючі рішення не повною мірою відповідають специфічним вимогам мікросистем. Необхідні нові підходи, що поєднують переваги різних топологій регуляторів напруги та забезпечують адаптацію схем керування та алгоритмів стабілізації, до умов експлуатації в автономних та ізолюваних енергетичних системах.

Враховуючи вищезазначене, особливо актуальним є розвиток гібридних схем (Рис. 3) регуляторів напруги, що можуть динамічно переключатися між різними режимами роботи залежно від поточних умов [6].

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка оптимізованих схем регуляторів напруги для забезпечення ефективного живлення мікросистем в умовах автономної роботи та нестабільного енергопостачання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: проаналізувати існуючі

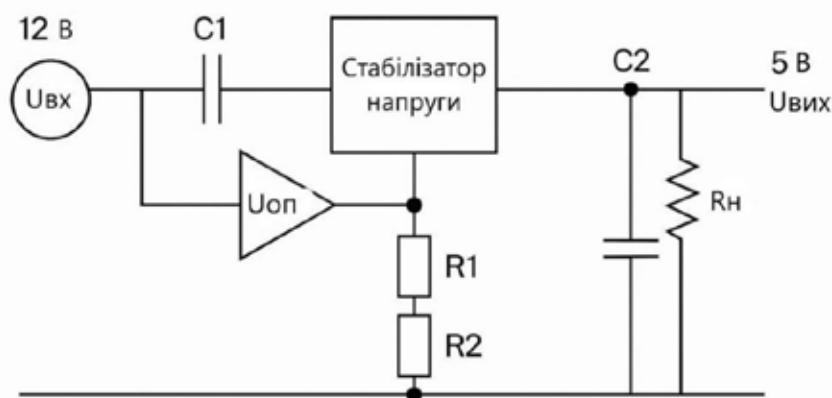


Рис. 1. Схема лінійного регулятора напруги

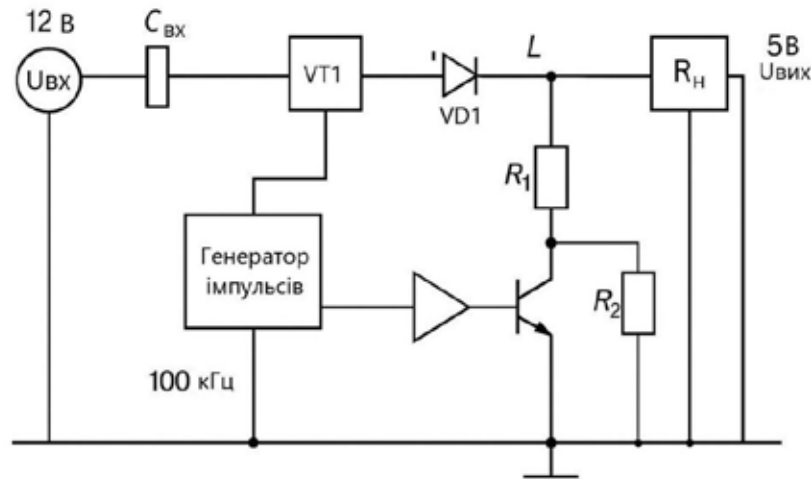


Рис. 2. Схема імпульсного регулятора напруги

топології регуляторів напруги та їх придатність для застосування в мікросистемах; дослідити вплив параметрів схеми на енергоефективність та якість стабілізації; розробити адаптивні алгоритми управління режимами роботи регулятора напруги для різних режимів роботи; запропонувати оптимізовану схему гібридного регулятора; провести моделювання та порівняльний аналіз характеристик розробленого рішення.

Виклад основного матеріалу. Аналіз специфічних вимог, що висуваються до мікросистем, показав необхідність розробки гібридного підходу до стабілізації напруги, що поєднує переваги лінійних та імпульсних регуляторів. Запропонована схема гібридного регулятора напруги (Рис. 3)

базується на адаптивному алгоритмі управління енергоспоживанням і режимами стабілізації, який дозволяє системі динамічно переключатися між різними режимами роботи, в залежності від поточних умов навантаження та параметрів вхідного живлення.

Основою розробленого рішення є модульна архітектура системи живлення, що включає первинний імпульсний стабілізатор (Рис. 2) напруги та вторинний лінійний регулятор (Рис. 1) тонкого налаштування вихідного рівня напруги. Такий підхід забезпечує високу енергоефективність регулятора при збереженні відмінних динамічних характеристик системи живлення та низького рівня пульсацій вихідної напруги.

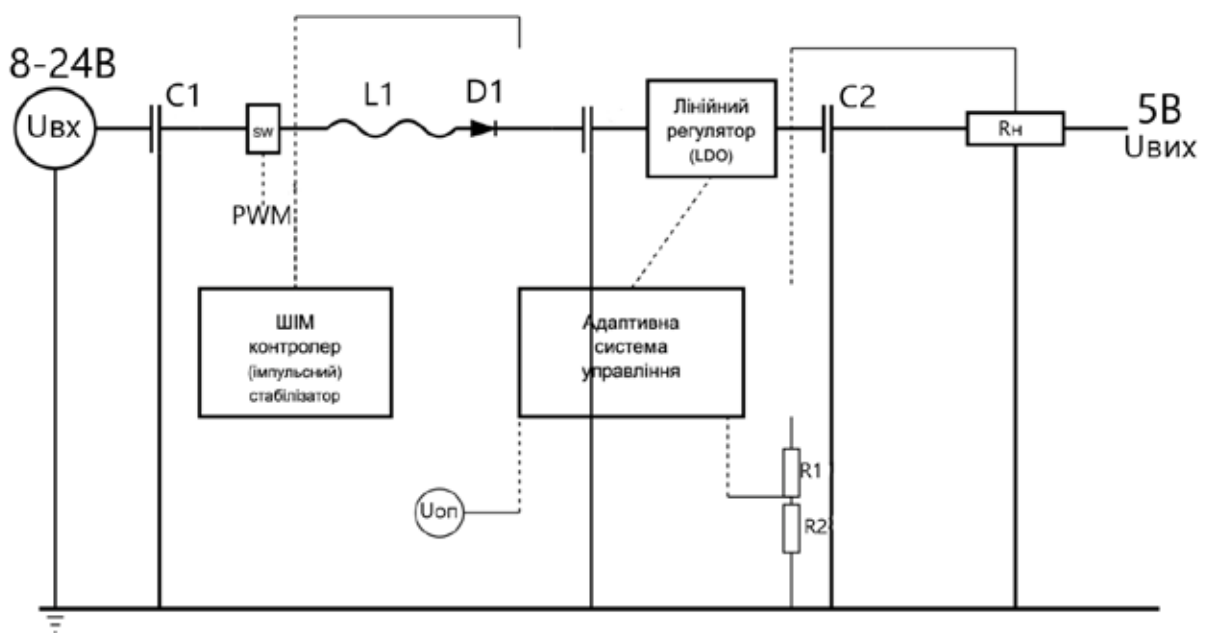


Рис. 3. Схема гібридного регулятора напруги

Первинний стабілізатор працює на відносно низькій частоті перемикання, що мінімізує втрати на перемикання, а вторинний регулятор компенсує залишкові пульсації та забезпечує точну стабілізацію.

Ключовою особливістю розробленої схеми регулятора напруги є система адаптивного управління режимами роботи, що аналізує параметри навантаження та автоматично оптимізує режим роботи. При легкому навантаженні на мікросистему, система переходить в режим підвищеної енергоефективності з періодичним вимкненням деяких блоків. При підвищеному навантаженні на вихід регулятора активуються додаткові канали живлення для забезпечення необхідної потужності системи.

Система контролю якості живлення включає моніторинг рівня пульсацій, швидкості зміни напруги та температурного режиму. За результатами аналізу цих параметрів відбувається корекція алгоритму управління модулем стабілізації для забезпечення оптимальних характеристик вихідної напруги в конкретних умовах експлуатації. Особливу увагу приділено забезпеченню стабільної роботи гібридного регулятора в перехідних режимах, що критично важливо для живлення чутливих мікросистем [7].

Адаптивні алгоритми управління. Розроблена система управління гібридним регулятором напруги (Рис. 3) базується на багаторівневому підході, що включає первинне управління потужністю енергетичних блоків, вторинне управління якістю напруги та третинне управління оптимізацією енергоефективності всього регулятора. Первинний рівень забезпечує базову стабілізацію напруги з використанням класичних алгоритмів управління.

Вторинний рівень здійснює корекцію динамічних характеристик вихідного каскаду та компенсацію збурень. Третинний рівень оптимізує параметри роботи регулятора напруги для мінімізації енергоспоживання.

Алгоритм адаптації параметрів регулятора базується на аналізі статистичних характеристик навантаження та вхідного живлення.

Система накопичує дані про типові режими роботи електронної мікросистеми та автоматично налаштовує параметри управління вихідними каскадами стабілізації для забезпечення оптимальних характеристик. Особливу увагу приділено прогнозуванню змін навантаження, що дозволяє заздалегідь підготувати систему до зміни режиму роботи.

Важливим елементом адаптивного алгоритму є система діагностики та самотестування регулятора напруги. Регулярний моніторинг ключових параметрів дозволяє виявити потенційні проблеми на ранній стадії роботи мікросистем та автоматично ввести корекції в алгоритм управління, що особливо важливо для систем, що працюють в автономному режимі тривалий час, без можливості технічного обслуговування.

Алгоритм також включає функцію адаптації алгоритму керування до умов ізольованої роботи регулятора напруги [8]. При відключенні від основної мережі система автоматично переходить в режим автономної роботи з корекцією параметрів стабілізації. Це забезпечує безперервне живлення критично важливих мікросистем навіть в умовах нестабільної роботи енергосистеми.

Результати проведеного моделювання гібридного регулятора напруги.

Моделювання характеристик гібридного регулятора напруги проводилось з використанням спеціалізованого програмного забезпечення для схемотехнічного аналізу, включаючи SPICE-симулятори (LTspice, PSpice), середовища проектування аналогових схем (Cadence Virtuoso, Synopsys HSPICE), а також інтегрованих платформ для моделювання силової електроніки (MATLAB/Simulink Power Electronics Toolbox, PLECS). Для аналізу теплових режимів використовувались засоби термічного моделювання (ANSYS Icepak, FloTHERM), а верифікація алгоритмів управління енергетичними режимами здійснювалась в середовищах реального часу (MATLAB/Simulink Real-Time, dSPACE).

Проведені дослідження показали значні переваги розробленого підходу порівняно з традиційними рішеннями. Енергоефективність гібридного регулятора склала 92–95% в широкому діапазоні навантажень, що на 15–20% перевищує показники лінійних регуляторів, та на 3–5% вища за показники традиційних імпульсних стабілізаторів. Особливо значне покращення спостерігається в режимах легкого навантаження, де енергоефективність розробленої системи досягає 97%.

Точність стабілізації вихідної напруги регулятора склала $\pm 0.1\%$ в статичному режимі та $\pm 0.3\%$ в динамічних режимах. Час встановлення перехідного процесу при стрибкоподібній зміні навантаження не перевищує 50 мкс, що забезпечує надійне живлення швидкодіючих мікросистем. Рівень пульсацій вихідної напруги знаходиться в межах 5–10 мВ при номінальному навантаженні.

Під час моделювання температурних характеристик, робота регулятора в діапазоні від -40°C до $+85^{\circ}\text{C}$ була стабільною. Температурний коефіцієнт вихідної напруги не перевищував $50 \text{ ppm}/^{\circ}\text{C}$, що забезпечує надійну роботу в різних кліматичних умовах.

Особливо важливим є збереження високої енергоефективності при підвищених температурах завдяки адаптивному алгоритму управління тепловими режимами.

Тестування стійкості до електромагнітних завад проводилось за допомогою програмного забезпечення. Дослідження показали відповідність розробленої системи живлення вимогам міжнародних стандартів. Система успішно пройшла випробування на стійкість до імпульсних завад, радіочастотних полів та кондуктивних завад.

Порівняльний аналіз з існуючими рішеннями.

Було проведено порівняння розробленого регулятора з комерційними аналогами, а саме таких фірм як:

1. Texas Instruments – TPS7A94 + TPS62125 (у парі)
2. Vicor – Power Modules (наприклад, PI3741)
3. Maxim Integrated – MAX17291 + MAX38902
4. Analog Devices – ADP5070 + LT3045

Таке порівняння з аналогами показало суттєві переваги розробленого регулятора напруги у всіх ключових параметрах. За енергоефективністю розроблене рішення перевищує найкращі комерційні зразки на 8–12%. Значна перевага в стабільності напруги та адаптивності до навантаження спостерігається в режимах змінного навантаження, де адаптивний алгоритм управління регулятором забезпечує оптимальну роботу в широкому діапазоні умов.

Габаритні характеристики розробленого регулятора на 25–30% менші за комерційні рішення, аналогічні за показником потужності, за рахунок оптимізації схемотехніки та використанню сучасної елементної бази, що критично важливо для майбутнього застосування в мініатюрних мікросистемах з обмеженим простором для розміщення компонентів живлення.

Вартість виробництва розробленого регулятора не перевищує рівня вартості комерційних аналогів, при значно кращих технічних характеристиках розробленої схеми. За рахунок оптимізації кількості компонентів та використанню стандартних елементів, що серійно випускаються. Масове виробництво дозволить додатково знизити собівартість на 15–20%.

Функціональні можливості розробленого рішення значно ширші за можливості традиційних

регуляторів за рахунок закладених функцій діагностики, адаптації та дистанційного моніторингу.

Таке рішення забезпечує можливість інтеграції в інтелектуальні системи управління енергоспоживанням та підвищить загальну надійність системи.

Особливості застосування регулятора напруги в автономних системах.

Розроблений гібридний регулятор напруги (Рис. 3) особливо ефективний для застосування в автономних енергетичних системах, де критично важливими є енергоефективність та надійність. Адаптивний алгоритм управління регулятором має автоматично оптимізувати роботу системи живлення залежно від доступної потужності джерела живлення, що особливо актуально для систем на відновлюваних джерелах енергії.

Закладена функція пріоритизації навантажень, дозволить автоматично відключати менш критичних споживачів електроенергії, при зниженні доступної потужності, що надає можливість забезпечити безперервне живлення найважливіших мікросистем навіть в умовах обмеженого енергоресурсу. Алгоритм враховує як поточне споживання напруги, так і прогнозовані зміни навантаження.

Інтеграція гібридного регулятора з системами накопичення енергії забезпечує оптимальне використання акумуляторів. Регулятор напруги автоматично переключатиметься між режимами заряду та розряду, в залежності від доступності первинного джерела енергії та поточного споживання, що подовжує час автономної роботи системи та підвищуватиме ресурс акумуляторів.

Особливо важливою є закладена функція роботи регулятора напруги в мережах постійного струму різної конфігурації.

Регулятор зможе працювати як в централізованих, так і в розподілених системах живлення, автоматично адаптуючись до топології мережі та параметрів інших підключених пристроїв.

Перспективи розвитку та практичного застосування. Результати дослідження відкривають широкі можливості для практичного застосування гібридних регуляторів напруги в різних галузях. Особливо перспективним є використання розробленої системи в системах інтернет речей, де необхідне надійне живлення великої кількості розподілених мікросистем.

Адаптивні властивості майбутнього регулятора надають можливість забезпечувати оптимальну роботу мікросистем в умовах змінних вимог до енергоспоживання.

Подальший розвиток технології живлення може включати інтеграцію штучного інтелекту для прогнозування режимів роботи регулятора та оптимізації параметрів управління. Машинне навчання дозволить системі в подальшому накопичувати дані/показники щодо роботи та автоматично покращувати алгоритми управління живленням для конкретних умов застосування.

Мініатюризація компонентів регулятора напруги надає можливості для створення інтегрованих рішень на основі спеціалізованих мікросхем, що дозволить додатково зменшити габарити та вартість системи живлення при збереженні всіх функціональних можливостей. Розробка спеціалізованих контролерів може забезпечити ще більшу енергоефективність та швидкодію регулятора.

Стандартизація інтерфейсів управління та моніторингу енергоспоживання сприятиме широкому впровадженню запропонованої технології в різних застосуваннях. Розробка відкритих протоколів комунікації надає змогу забезпечити сумісність з існуючими системами управління та моніторингу енергоспоживання.

Висновки. Проведені дослідження та моделювання підтвердили ефективність запропонованого підходу до оптимізації схем регуляторів напруги для живлення мікросистем. Спроектований гібридний регулятор з адаптивним управлінням забезпечує значне покращення енергоефективності при збереженні високої точності стабілізації вихідної напруги та швидкодії.

Основними досягненнями роботи є:

- розробка адаптивного алгоритму управління регулятором напруги, що надає змогу авто-

матично оптимізувати параметри роботи відповідно до умов експлуатації;

- створення гібридної схемотехніки, що поєднує переваги різних типів регуляторів;

- забезпечення високої енергоефективності гібридного регулятора напруги в широкому діапазоні навантажень;

- реалізація функцій діагностики та самотестування для підвищення надійності системи живлення мікросистем.

Розрахунки та результати моделювання показали суттєві переваги розробленого рішення порівняно з його існуючими аналогами за всіма ключовими параметрами. Енергоефективність регулятора становила 92–95%, точність стабілізації вихідної напруги $\pm 0.1\%$ та час встановлення перехідного процесу менше 50 мкс що буде забезпечувати надійне живлення найвимогливіших мікросистем.

Практичне значення роботи полягає в можливості створення високоефективних систем живлення для автономних та ізованих енергетичних комплексів. Розроблена технологія гібридного регулювання напруги буде особливо актуальна для систем критичної інфраструктури, що повинні забезпечувати безперервну роботу в умовах нестабільного енергопостачання.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розробку спеціалізованих мікросхем для реалізації адаптивних алгоритмів управління гібридним регулятором напруги та створення стандартизованих рішень для масового впровадження систем живлення на основі гібридних регуляторів в різних галузях промисловості.

Список літератури:

1. Rettig E., Fischhendler I., Schlecht F. The meaning of energy islands: Towards a theoretical framework. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2023. № 187. С. 113732. DOI:10.1016/j.rser.2023.113732 (дата звернення: 15.07.2025).
2. Task Force. Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment – X (as of May 24, 2023). URL: <https://surl.li/zeysrz> (дата звернення: 15.07.2025).
3. Chowdhury S., Ten S., Crossley P. Operation and control of DG based power island in Smart Grid environment / *Smart Grids for Distribution: Proceedings of CIRED Seminar*. 2008. URL: <https://doi.org/10.1049/ic:20080490> (дата звернення: 15.07.2025).
4. Trujillo C., Velasco D., Figueres E., Garcepa G. Local and Remote Techniques for Islanding Detection in Distributed Generators. *Distributed generation*. 2010. URL: <https://surl.li/dyguje> (дата звернення: 15.07.2025).
5. Zoby M., Yanagihara J. Analysis of the Primary Control System of a Hydropower Plant in Isolated Model. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2009. DOI: 10.1590/S1678-58782009000100002 (дата звернення: 15.07.2025).
6. Бурбело М. Й., Лебедь Д. Ю. Дослідження ефективності схеми керування напругою конденсатора уніфікованого регулятора якості електроенергії для зменшення коливань напруги. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2023. № 1. С. 21–28. DOI: 10.31649/1997-9266-2023-166-1-21-28.
7. Андрушко С. Особливості регулювання режимів синхронного генератора, що забезпечує живлення розподільчої мережі, ізованої від енергосистеми. *Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи: матеріали міжнар. наук.-практ. інтернет-конф.* 2024. URL: <https://surl.li/tzqdos> (дата звернення: 15.07.2025).

8. Штуць А., Зозуляк І., Балабан Д. Аналіз та дослідження методів і засобів діагностики ізоляції електрообладнання. *Вісник ХНУ. Технічні науки*. 2024. Том 337, № 3(2). С. 79–84. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-18.

9. І. Фролов. Аналіз поточного стану енергосистеми та стратегії розвитку розосередженої генерації в Україні. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2024. № 67. С. 48–53. DOI: 10.15407/publishing2024.67.048 (дата звернення: 15.07.2025).

10. Головатий А. І., Теслюк В. М., Ріпак Н. С. Розроблення стабілізатора змінної напруги з мікроконтролерним управлінням. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2022. Т. 32. № 1. С. 79–84. DOI: 10.36930/40320112.

Bilevskyi P.S. OPTIMIZATION OF VOLTAGE REGULATOR SCHEMES FOR MICROSYSTEM POWER SUPPLY

The article considers the problem of providing stable and efficient power supply to microsystems in conditions of unstable or isolated power supply. Given the growing need for autonomous and distributed energy solutions, key approaches to voltage stabilization have been explored, in particular the use of linear, pulse and hybrid regulators. Particular attention is paid to the analysis of the advantages and disadvantages of traditional stabilization schemes and the need to create hybrid regulators that combine high control accuracy with minimal energy losses is substantiated. The proposed structure includes a primary pulse stabilizer and a secondary linear regulator, which allows you to achieve precise regulation of the output voltage with high energy efficiency. The developed solution is based on an adaptive control algorithm that provides a dynamic change of operating modes depending on the load, temperature, operating conditions and the presence of electromagnetic interference.

The simulation carried out in LTspice, MATLAB/Simulink, ANSYS and other electronic and thermal analysis tools showed high technical characteristics of the hybrid regulator: energy efficiency of 92–97%, stabilization accuracy $\pm 0.1\%$, reaction time up to 50 μs . The thermal resistance of the system is confirmed by stable operation in a wide temperature range – from -40°C to $+85^{\circ}\text{C}$. The ability to self-diagnose and automatically adjust parameters has been studied, which is especially important for uninterrupted operation in autonomous mode. Comparative analysis with commercial analogues of Texas Instruments, Analog Devices, Maxim Integrated and Vicor confirmed the higher energy efficiency, compactness and functional flexibility of the developed system.

The proposed solution has significant potential for practical implementation in Internet of Things (IoT) systems, critical infrastructure, telecommunications, medicine, autonomous energy complexes and mobile electronics. Further development of the technology is possible through the integration of artificial intelligence for self-optimization of stabilization modes and the introduction of standardized interfaces for energy management, which opens up prospects for mass application in high-tech industries.

Key words: voltage regulator, microsystems, stabilization, energy efficiency, autonomous systems, distributed generation.

Дата надходження статті: 10.07.2025

Дата прийняття статті: 18.07.2025

Опубліковано: 27.10.2025