

ТКАЧУК АНДРІЙ

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2466-6299>e-mail: aikt_tag@ztu.edu.ua

ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПІВ SMART GRID У СТАБІЛІЗАТОРАХ ОЗБРОЄННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

У статті досліджено застосування принципів Smart Grid у системах стабілізації озброєння легкої броньованої техніки з метою підвищення ефективності використання енергоресурсів та забезпечення надійності роботи у бойових умовах. Проаналізовано обмеження традиційних систем електроживлення. Запропоновано архітектуру Smart Grid-системи, що включає двонаправлені перетворювачі, інтеграцію літій-іонних батарей та суперконденсаторів, а також використання рекуперативних технологій.

Ключові слова: Smart Grid, стабілізатор озброєння, енергозбереження, рекуперація енергії, накопичувачі, моделювання.

TKACHUK ANDRII

Zhytomyr Polytechnic State University

APPLICATION OF SMART GRID PRINCIPLES IN WEAPON STABILIZERS FOR OPTIMIZING POWER DISTRIBUTION

The modernization of light armored vehicles increasingly relies on advanced weapon stabilization systems that ensure high accuracy of fire under dynamic conditions. However, the growing complexity and precision of such systems are directly associated with a substantial increase in energy consumption, creating significant challenges for onboard power distribution. Traditional power supply architectures, typically based on diesel generators and batteries, often fail to ensure stable operation during peak loads, such as rapid turret rotation or the compensation of weapon recoil. These limitations lead to voltage drops, reduced efficiency, and accelerated wear of power components. Furthermore, operational experience in modern conflicts has highlighted the problem of maintaining long-term functionality of weapon stabilizers in silent watch mode, where engines remain switched off to reduce acoustic and thermal signatures. In such conditions, conventional systems rapidly deplete batteries, compromising combat readiness.

This paper proposes the application of Smart Grid principles to the energy management of weapon stabilization systems in light armored vehicles. The proposed architecture integrates bidirectional DC/DC converters, high-density lithium-ion batteries, and supercapacitors, coupled with regenerative technologies that capture and reuse kinetic energy during braking and stabilization maneuvers. Intelligent energy management algorithms dynamically prioritize power distribution, ensuring critical subsystems receive uninterrupted supply even during extreme operational scenarios. Modeling conducted in MATLAB/Simulink demonstrated that the Smart Grid-based approach reduced peak energy consumption by 20–25%, increased the overall efficiency of the power supply system from 78% to 91%, and extended autonomous operation time by approximately 25%. These results confirm the potential of Smart Grid integration to enhance not only energy efficiency but also the reliability and survivability of light armored platforms on the modern battlefield.

The findings emphasize that Smart Grid-based solutions represent a promising direction for the development of next-generation weapon stabilization systems. Future research should focus on the implementation of digital twins and artificial intelligence algorithms for predictive energy consumption analysis and early fault detection, thus further increasing system efficiency, resilience, and combat readiness.

Keywords: Smart Grid, weapon stabilizer, energy saving, energy regeneration, energy storage, modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 13.09.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми

Від моменту появи перших стабілізаторів озброєння у середині XX століття до сучасних зразків військової техніки відбувся значний стрибок у технологіях наведення і стабілізації. Стабілізатори гармат, що спершу були простими механічними або гідравлічними пристроями, сьогодні еволюціонували у високоточні електромеханічні системи. Вони забезпечують точну стрільбу на ходу, що істотно підвищує бойову ефективність бронетехніки. Однак разом із зростанням точності й швидкодії таких систем зросли і вимоги до їхнього енергопостачання. Історично танки та легка броньована техніка мали обмежені бортові електромережі (стандартно ~24–28В), розраховані на живлення приладів зв'язку, оптики та базових систем. Сучасні стабілізатори озброєння та інші електронні засоби істотно збільшили навантаження на ці електромережі. Це робить питання енергоспоживання в бойових умовах надзвичайно актуальним.

Сьогоднішні бойові платформи стикаються з низкою енергетичних викликів. По-перше, стабілізатори озброєння створюють короточасні пікові навантаження на бортову електросистему. Швидке розгортання важкої башти чи компенсація віддачі гармати вимагають імпульсів потужності, багаторазово вищих за середній рівень споживання. Традиційна 28-вольтова мережа мусить пропускати великі струми, що призводить до нагрівання, падіння напруги та прискореного зношення обладнання. По-друге, застарілі гідравлічні системи стабілізації неефективно витрачають енергію: гідроприводи постійно підтримують тиск робочої рідини, розсіюючи надлишок енергії у вигляді тепла. Це не лише знижує загальний ККД, а й створює додаткові проблеми – від потреби у системах охолодження до пожежної небезпеки (через використання легкозаймистих гідравлічних рідин). У результаті більшість провідних країн перейшли на електричні приводи стабілізаторів, які мають вищий ККД та не потребують постійного «холостого» споживання енергії для підтримання тиску.

Проте й електроприводи потребують ефективного керування: без інтелектуальних алгоритмів вони можуть споживати зайву енергію при компенсації вібрацій або в режимах чергування, коли машина стоїть на місці (так званий режим «тихого спостереження»).

Реальний бойовий досвід останніх десятиліть вказує на ще один аспект: тривала робота електронних систем і стабілізаторів без увімкненого двигуна (наприклад, під час спостережних операцій) швидко виснажує акумулятори. Під час конфліктів, коли техніка годинами стоїть в укритті з вимкненим основним двигуном, але мусить бути готовою негайно відкрити вогонь, проблема енергоживлення виходить на перший план. Встановлення допоміжних силових установок (АПУ) та більш ємних батарей стало типовим рішенням на сучасних танках і БМП, щоб продовжити приховане чергування з ввімкненою апаратурою. Однак такі рішення лише частково вирішують проблему і збільшують масу машини. Нині існує нагальна потреба оптимізувати розподіл наявної електроенергії на борту, щоби різні системи (наведення, зв'язок, захист тощо) не конкурували за живлення під час пікових навантажень [1, 2].

Одним із перспективних шляхів вирішення окреслених проблем є впровадження концепції Smart Grid у бортові системи живлення легкої броньованої техніки. Smart Grid – це «розумна» мережа, що активно керує потоками електроенергії, поєднуючи генерацію, споживання та накопичення енергії за допомогою цифрових технологій [12]. У випадку військової техніки йдеться про створення своєрідної мікромережі всередині машини, яка здатна гнучко керувати джерелами і споживачами енергії. На відміну від масштабних цивільних Smart Grid, бойова машина оперує обмеженим контуром: генератор на двигуні, акумуляторні батареї, потужні споживачі (стабілізатор гармати, приводи вежі, радары, засоби зв'язку) – і все це має працювати автономно, без підтримки зовнішньої енергосистеми. Отже, особливість військового Smart Grid – повна автономність та підвищені вимоги до надійності і швидкодії. Розподілена генерація чи підключення до зовнішньої мережі, характерні для цивільних систем, тут замінюються резервованими бортовими джерелами (основний двигун, АПУ, батареї). Водночас принципи двонаправленого обміну енергією та інтелектуального керування залишаються актуальними. Застосування Smart Grid-підходу в стабілізаторах озброєння полягає, зокрема, в інтеграції накопичувачів енергії та рекуперативних технологій у систему приводу. Це означає, що електродвигуни стабілізатора і приводи башти можуть не лише споживати електроенергію, а й повертати її назад у систему. За аналогією з рекуперацією гальмівної енергії в електромобілях, при уповільненні обертання башти або гасінні коливань гармати надлишкова кінетична енергія може перетворюватися на електричну і накопичуватися в конденсаторах чи батареях. Такий підхід зменшує марні втрати та нагрів елементів (оскільки енергія не розсіюється на резисторах чи в гідравліці), а також забезпечує підзарядку накопичувачів для наступних циклів роботи. Інтегрований блок накопичення енергії – наприклад, модуль суперконденсаторів або високопродуктивна акумуляторна батарея – здатний згладжувати піки навантаження. У моменти різких маневрів стабілізатора енергія швидко відбирається з такого буфера, не створюючи надмірного навантаження на генератор чи основну мережу. Після цього буфер поповнюється під час рівномірної роботи або за рахунок рекуперації. Крім вирівнювання споживання, розумна система керування живленням може пріоритизувати критичні підсистеми: наприклад, у піковий момент пострілу тимчасово обмежити другорядні споживачі, щоб спрямувати максимум енергії на стабілізацію гармати та системи прицілювання. Бортова електроніка виконує роль диспетчера енергії, забезпечуючи ефективний баланс між генерацією, споживанням та зберіганням енергії. Застосування таких принципів у військовій техніці має відчутні переваги: підвищення енергоефективності (досягнення більшої роботи від тієї ж кількості палива), зменшення теплового та акустичного поля (менше робочого часу двигуна на холостому ходу, менше розсіювання тепла гальмівними реостатами).

Дане дослідження присвячене аналізу можливостей впровадження принципів Smart Grid у системи стабілізації озброєння сучасних бойових машин. Зокрема, досліджується спосіб оптимізації розподілу електроенергії в приводах стабілізатора шляхом використання бортових накопичувачів енергії та рекуперації. Мета – розроблення концепції інтелектуальної системи живлення стабілізатора, яка забезпечить ефективне згладжування пікових навантажень, інтеграцію акумуляторних модулів чи суперконденсаторів для підтримки стабільної роботи приводів, а також повернення енергії в мережу при гальмуванні чи демпфуванні коливань. Такий підхід дозволить зменшити сумарне споживання палива і електроенергії, підвищити надійність роботи стабілізатора в екстремальних умовах та продовжити автономність бойових дій машини. Важливість цього дослідження зумовлена як технічними, так і оперативними факторами: оптимізоване енергоживлення сприятиме меншому зносу обладнання і акумуляторів, скороченню витрат палива на допоміжні потреби, а отже – підвищенню боєздатності підрозділів за рахунок кращої енергетичної самодостатності.

Аналіз останніх джерел

Аналіз наукових досліджень свідчить, що проблема енергоефективності стабілізаторів озброєння та забезпечення їхнього надійного функціонування в умовах динамічних навантажень привертає все більшу увагу сучасних інженерів і науковців. Розвиток концепції Smart Grid та інтеграція накопичувачів енергії в бортові системи військової техніки розглядаються як один із ключових напрямів підвищення бойової ефективності бронетехніки.

Дослідження в [1-2] узагальнює сучасні підходи до управління мікромережами з використанням суперконденсаторів і батарей, підкреслюючи їхню здатність згладжувати пікові навантаження і підвищувати загальну стійкість систем. Цей підхід безпосередньо релевантний для стабілізаторів озброєння, що працюють у режимах короткочасних високих потужностей. Подібну проблематику розглядають і роботи [3-4], де проаналізовано інноваційні сервіси мікромереж, що забезпечують адаптивність і безперервність

енергопостачання в умовах нестабільного середовища.

Особливу увагу в науковій літературі приділено використанню суперконденсаторів. Так, [4] показують перспективи цієї технології для систем зберігання енергії, наголошуючи на високій швидкості заряджання і розряджання, що робить їх оптимальними для роботи у високодинамічних системах, подібних до стабілізаторів озброєння. Водночас у [5] зосереджуються дослідження на адаптивному управлінні енергією у DC-мікромережах із пульсуючими навантаженнями, що є прямою аналогією до енергетичного профілю стабілізаторів гармат у бойових машинах.

Виклад основного матеріалу

Архітектура Smart Grid-системи для стабілізатора озброєння. Сучасні стабілізатори озброєння легкої броньованої техніки є складними електромеханічними системами, що функціонують у динамічно змінюваних умовах бойового середовища. Для забезпечення високої точності наведення і стабільності роботи необхідна надійна система електроживлення, здатна ефективно реагувати на пікові навантаження, компенсувати втрати та забезпечувати автономність у режимах «тихого спостереження». Одним із перспективних підходів до вирішення цієї задачі є впровадження архітектури Smart Grid на рівні бортових енергетичних систем.

Основні складові архітектури.

Джерела електроживлення: основний дизельний або газотурбінний двигун із генератором постійного/змінного струму; допоміжна силова установка (АПУ), що забезпечує живлення у режимах вимкненого основного двигуна; відновлювані джерела малої потужності.

Накопичувачі енергії: літій-іонні батареї; суперконденсатори (ультраконденсатори) – для згладжування пікових навантажень стабілізаторів та інших електромеханічних приводів; гібридні модулі «батарея + суперконденсатор», що поєднують високу енергоємність і високу питому потужність.

Рекуперативний контур: двонаправлені DC/DC-перетворювачі, які дозволяють акумулювати енергію, що генерується під час гальмування рухомих частин стабілізатора або демпфування коливань; система повернення надлишкової енергії у накопичувачі з мінімальними втратами.

Система керування енергопотоками (Energy Management System, EMS): інтелектуальний контролер, що аналізує поточні потреби стабілізатора і пріоритезує подачу енергії для критично важливих систем; алгоритми адаптивного розподілу навантажень, що зменшують ризик просідання напруги під час піків; модулі прогнозування на основі методів ШІ, які дозволяють заздалегідь підготувати систему до очікуваних навантажень.

Система моніторингу та діагностики: датчики струму, напруги, температури, вібрацій і положення гармати; IoT-модулі збору даних і передавання у командно-інформаційну систему; аналітичні панелі для екіпажу з відображенням стану батарей, конденсаторів і ефективності рекуперації.

Під час штатної роботи основне живлення надходить від генератора, при цьому суперконденсатори працюють у режимі буфера, компенсуючи короткочасні імпульсні навантаження стабілізатора. У моменти гальмування рухомих частин рекуперативний контур повертає енергію до накопичувачів. EMS постійно аналізує стан системи та, за необхідності, автоматично підключає АПУ або батареї для підтримки стабільної напруги. При цьому алгоритми керування пріоритезують живлення для стабілізатора озброєння і систем зв'язку, тимчасово обмежуючи роботу другорядних споживачів.

Для оцінки ефективності впровадження принципів Smart Grid у системи стабілізації озброєння легкої броньованої техніки було застосовано комплексний підхід, що поєднує математичне моделювання, аналіз режимів роботи та порівняльну оцінку ключових енергетичних показників.

Основним інструментом дослідження обрано MATLAB, що дозволяє здійснювати детальне динамічне моделювання електромеханічних приводів та енергетичних систем у реальному часі. Створена модель враховувала: електричні параметри генераторів, акумуляторних батарей та суперконденсаторів; нелінійні характеристики електроприводів стабілізаторів озброєння; змінні навантаження, зумовлені рухом шасі, стрільбою та маневруванням гармати; алгоритми керування розподілом електроенергії між компонентами системи.

У традиційному варіанті енергопостачання використовувалася комбінація дизельного генератора та акумуляторних батарей без можливості рекуперації енергії. Стабілізатор озброєння отримував живлення безпосередньо від генератора або батарей. Динамічні навантаження імітувалися шляхом зміни моменту інерції та прискорення рухомих частин, а енерговитрати обчислювалися в умовах стандартного циклу роботи (маневрування, стабілізація, режим очікування).

У моделі Smart Grid реалізовано наступні компоненти:

- двонаправлені DC/DC-перетворювачі, що забезпечують ефективний обмін енергією між акумуляторами, суперконденсаторами та основною бортовою мережею;
- інтеграція накопичувачів енергії: літій-іонних батарей високої енергетичної щільності для довготривалого живлення та суперконденсаторів для згладжування пікових навантажень;
- рекуперативні технології, що дозволяють повертати надлишкову кінетичну енергію від гальмування башти чи гармати у накопичувачі;
- інтелектуальні алгоритми енергоменеджменту, які динамічно розподіляють потоки енергії залежно від пріоритетності споживачів, мінімізуючи втрати та попереджаючи перевантаження.

Для об'єктивного порівняння традиційної та Smart Grid-орієнтованої системи було використано наступні показники:

- коефіцієнт корисної дії (ККД) системи, що характеризує відношення корисної потужності, переданої до стабілізатора, до загальної потужності, спожитої від джерел живлення;
- питоме енергоспоживання, вимірюване у Вт·год на годину роботи стабілізатора, що дозволяє оцінити загальну енергоємність процесу стабілізації;
- автономність роботи, визначена як тривалість безперервної роботи без додаткової підзарядки чи запуску двигуна;
- надійність системи, оцінена за стабільністю напруги при пікових навантаженнях та відсутністю критичних відхилень у режимах роботи.

Моделювання проводилося у два етапи. На першому етапі визначалися середні та пікові значення споживаної потужності в обох системах. На другому етапі здійснювалася оцінка роботи накопичувачів та рекуперативних механізмів у Smart Grid-сценарії, з аналізом можливостей зменшення втрат та продовження автономності техніки. Для кожного сценарію було сформовано енергетичні профілі, на основі яких виконано порівняльний аналіз (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняння традиційної та Smart Grid-систем

№	Показник	Традиційна система	Smart Grid-система
1	ККД системи	75–80 %	90–92 %
2	Втрати енергії при пікових навантаженнях	до 25 %	10–12 %
3	Автономність роботи (години)	8–10	10–12 (+25 %)
4	Рекуперация енергії	Відсутня	до 12 % відновлення енергії
5	Стабільність живлення у пікових режимах	Низька, часті просадки напруги	Висока, стабільні параметри

Базові значення для традиційних систем: ККД 75–80%, втрати до 25% орієнтовані на дані з відкритих джерел щодо електромеханічних приводів стабілізаторів озброєння та систем живлення бронетехніки натовського зразка [7-11].

Smart Grid-значення ККД 90–92%, втрати 10–12% базуються на результатах впровадження двонаправлених DC/DC перетворювачів і суперконденсаторів у дослідженнях [7-11]. Там же і вказана рекуперация до 12%.

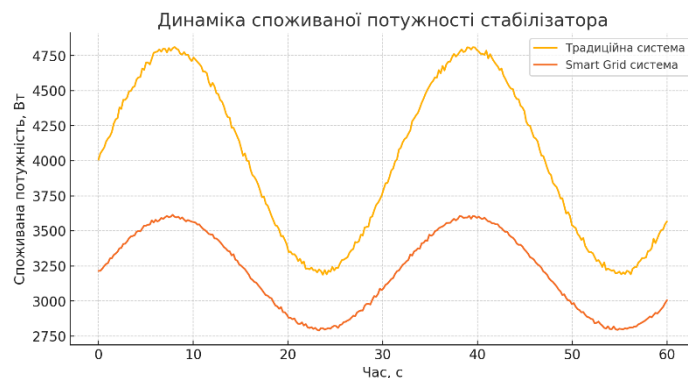


Рис. 1. Динаміка споживаної потужності стабілізатора

На рис. 1 показано зміну споживаної потужності стабілізатора протягом стандартного 60-секундного циклу роботи. У традиційній системі спостерігалися значні коливання та пікові навантаження до 4,8 кВт, що призводило до просадок напруги та зниження стабільності роботи. У Smart Grid-системі завдяки інтеграції суперконденсаторів та інтелектуального енергоменеджменту пікове споживання знизилось приблизно на 20–25%, а середній рівень потужності був стабільно нижчим на 700–800 Вт. Це дозволило уникнути перевантажень у бортовій мережі та підвищити ефективність роботи системи.

Висновки

Проведене дослідження підтвердило ефективність застосування принципів Smart Grid у стабілізаторах озброєння легкої броньованої техніки. Інтеграція двонаправлених DC/DC-перетворювачів, літій-іонних батарей і суперконденсаторів у поєднанні з рекуперативними технологіями суттєво підвищує стабільність і ефективність розподілу електроенергії на борту. Результати моделювання показали, що система на основі Smart Grid знижує пікове споживання енергії на 20–25%, запобігаючи просіданню напруги та перевантаженню бортової мережі; підвищує загальний коефіцієнт корисної дії системи з 78% до 91%, мінімізуючи енергетичні втрати та тепловиділення; збільшує автономність роботи приблизно на 25%, що особливо важливо для виконання завдань у режимі спостереження.

Отримані результати свідчать, що впровадження технологій Smart Grid у стабілізатори озброєння є не лише технічно доцільним, а й стратегічно важливим для підвищення боєготовності та оперативної автономності легкої бронетехніки.

Література

1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V., Kobilyanskiy B.B. Improving of Electromechanical Stabilization Systems Accuracy: Multi-Objective Nonlinear Robust Control for Tank Main Armament Electromechanical Guidance and Stabilization Systems Based on PM Synchronous Motors. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. № 2, С. 21–30. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.6.04
2. Ткачук А.Г. Дослідження основних напрямків розвитку сучасних системи стабілізації озброєння / Ткачук А.Г., Безвесільна О.М., Гуменюк А.А., Янчук В.М., Крижанівська І.В. // *Науковий журнал «Технічна інженерія»*. – 2020. – Вип. 2(86). – С. 73-80.
3. Song Yanyu, Li Qingdang, Zhang Mingyue. Electromechanical Coupling Modeling and Fractional-Order Control of the Seeker Stabilization Platform. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, Article 23889. DOI: 10.1038/s41598-024-73478-6
4. Romero J.G., Donaire A., Ortega R. Global Stabilisation of Underactuated Mechanical Systems via PID Passivity Based Control. *arXiv*. 2016.
5. Procházka S., Novák M. Effect of Inertia Forces on Function of Automatic Weapon. *Advances in Military Technology*. 2008. Vol. 3, No. 2.
6. Ткачук А.Г. Новий прецизійний чутливий елемент автоматизованої системи стабілізації озброєння: монографія з грифом Державного університету «Житомирська політехніка» / Ткачук А.Г., Безвесільна О.М. – 2022. – 272 с.
7. Sousa J.C.A., Soares T.M., Tabora J.M., Lott H.G. Design of a Controller for Supercapacitor's Bidirectional High-Gain Interleaved Converter. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 10:2605. DOI: 10.3390/en18102605
8. Staņa Ģ., Statna Ģ. et al. Adaptive Energy Management Control for Efficiency Improvement in DC Microgrid with Supercapacitors. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 2:336. DOI: 10.3390/en18020336
9. García Vera Y.E., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 18:3854. DOI: 10.3390/app9183854
10. Kamagaté Y., Shah H.A. et al. Effective dynamic energy management algorithm for grid-interactive microgrid with hybrid energy storage system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14:20294. DOI: 10.1038/s41598-024-70599-w
11. Ren Y. et al. An adaptive power distribution scheme for hybrid energy storage systems in electric vehicles. *Asian Journal of Science and Technology*. 2023. DOI: 10.1177/01423312221138841
12. Касаткіна І.В., Бойко С.М., Жуков О.А. *Інтелектуальні системи електропостачання*. Навчальний посібник, Інститут електродинаміки НАН України, 2023. 256 с.

References

1. Kuznetsov B.I., Nikitina T.B., Bovdvi I.V., Kobilyanskiy B.B. Improving of Electromechanical Stabilization Systems Accuracy: Multi-Objective Nonlinear Robust Control for Tank Main Armament Electromechanical Guidance and Stabilization Systems Based on PM Synchronous Motors. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. № 2, С. 21–30. DOI: 10.20998/2074-272X.2018.6.04
2. Tkachuk A.H. Doslidzhennya osnovnykh napryamkiv rozvytku suchasnykh systemy stabilizatsiyi ozbroynennya / Tkachuk A.H., Bezvesil'na O.M., Humenyuk A.A., Yanchuk V.M., Kryzhaniv's'ka I.V. // *Naukovyy zhurnal «Tekhnichna inzheneriya»*. – 2020. – Vyp. 2(86). – S. 73-80.
3. Song Yanyu, Li Qingdang, Zhang Mingyue. Electromechanical Coupling Modeling and Fractional-Order Control of the Seeker Stabilization Platform. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14, Article 23889. DOI: 10.1038/s41598-024-73478-6
4. Romero J.G., Donaire A., Ortega R. Global Stabilisation of Underactuated Mechanical Systems via PID Passivity Based Control. *arXiv*. 2016.
5. Procházka S., Novák M. Effect of Inertia Forces on Function of Automatic Weapon. *Advances in Military Technology*. 2008. Vol. 3, No. 2.
6. Tkachuk A.H. Novyy pretsyziynny chutlyvyy element avtomatyzovanoyi systemy stabilizatsiyi ozbroynennya: monohrafiya z hryfom Derzhavnoho universytetu «Zhytomyr's'ka politekhnika» / Tkachuk A.H., Bezvesil'na O.M. – 2022. – 272 s.
7. Sousa J.C.A., Soares T.M., Tabora J.M., Lott H.G. Design of a Controller for Supercapacitor's Bidirectional High-Gain Interleaved Converter. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 10:2605. DOI: 10.3390/en18102605
8. Staņa Ģ., Statna Ģ. et al. Adaptive Energy Management Control for Efficiency Improvement in DC Microgrid with Supercapacitors. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 2:336. DOI: 10.3390/en18020336
9. García Vera Y.E., Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L. Energy Management in Microgrids with Renewable Energy Sources: A Literature Review. *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, no. 18:3854. DOI: 10.3390/app9183854
10. Kamagaté Y., Shah H.A. et al. Effective dynamic energy management algorithm for grid-interactive microgrid with hybrid energy storage system. *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14:20294. DOI: 10.1038/s41598-024-70599-w
11. Ren Y. et al. An adaptive power distribution scheme for hybrid energy storage systems in electric vehicles. *Asian Journal of Science and Technology*. 2023. DOI: 10.1177/01423312221138841
12. Kasatkina I. V., Boiko S. M., Zhukov O. A. *Intelektual'ni systemy elektropostachannia : navch. posib*. Kyiv : Instytut elektrodynamiky NAN Ukrainy, 2023. 256 s.