

Кримська А.О.

Державний торговельно-економічний університет

Дідок В.Ю.

Київський національний університет будівництва і архітектури

Столярчук В.В.

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ІНЖЕНЕРНИХ СИСТЕМАХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Актуальність дослідження зумовлено все більшою потребою в скороченні енергетичних витрат у промисловості на фоні зношеності інфраструктури, зростання тарифів, жорсткіших екологічних вимог і необхідності забезпечення енергетичної стабільності виробничих процесів. Енергоефективність інженерних систем розглядається як стратегічний ресурс підприємства, що впливає на конкурентоспроможність, операційну стійкість і довгострокову економічну ефективність.

Мета дослідження полягає в комплексному аналізі функціонування інженерних систем промислових об'єктів з позиції енергоефективності, в оцінюванні можливостей технічної та цифрової модернізації їх з урахуванням економічної доцільності, а також у формуванні практичних рекомендацій для зниження енергоспоживання в умовах виробничого середовища.

Методологія дослідження ґрунтується на поєднанні системного аналізу архітектури інженерних систем, узагальнення підходів до енергомоніторингу й моделювання енерговитрат, а також на критичному аналізі нормативної бази, потенціалу автоматизованих технологій управління та фінансових моделей модернізації. Застосовано елементи порівняльного, факторного і структурно-функціонального аналізу.

Результати дослідження. Вивчено принципи енергозбереження, що реалізуються в сучасних системах підприємств, зокрема балансування навантаження, рекуперацію, адаптивне керування та цифрову автоматизацію. Узагальнено підходи до оцінювання енергоефективності на основі нормативного, індикативного, коефіцієнтного й автоматизованого аналізу. Виявлено ефективність інтелектуальних технологій моніторингу – SCADA, IoT, AI-платформ – з метою переходу до превентивного управління енергоспоживанням. З'ясовано ключові причини, що стримують модернізацію: застарілість обладнання, обмежений доступ до фінансування, низький рівень енергоменеджменту й невідповідність регуляторного середовища.

Висновки. Доведено, що підвищення енергоефективності можливе лише за умови цілісного підходу, який включає технічну реконструкцію, впровадження адаптивного управління й енергоменеджменту відповідно до міжнародних стандартів. Підтверджено ефективність інтелектуалізації енергетичних систем для досягнення стабільного енергетичного балансу.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробленні цифрових моделей адаптивного управління енергоспоживанням, інтеграції інструментів машинного навчання для прогнозування навантажень, а також у вдосконаленні нормативно-методичних засад енергоефективної політики в промисловості.

Ключові слова: енергоменеджмент, інтелектуальні технології моніторингу, автоматизоване керування, технічна модернізація, енергетичний аудит, цифрова аналітика, нормативна база.

Постановка проблеми. Забезпечення високого рівня енергоефективності в інженерних системах промислових об'єктів є однією з ключових передумов сталого розвитку виробничого сектора

в умовах усе жорсткіших вимог до раціонального використання ресурсів і зниження негативного впливу на довкілля. У сучасних умовах функціонування промисловості проблема енергоспожи-

вання набула багатогранного характеру, що охоплює як технічні, так й організаційно-економічні аспекти. Необхідність скорочення енергетичних витрат без зниження продуктивності й технологічної надійності зумовлює підвищення уваги до методів оптимізації енергетичних потоків, модернізації інженерних мереж і впровадження інтелектуальних систем управління споживанням. Проблематика ускладнюється значною зношеністю основних фондів, низькою адаптованістю застарілих технічних рішень до новітніх стандартів енергоефективності, а також обмеженими фінансовими ресурсами підприємств. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває пошук науково обґрунтованих підходів до енергоефективної реконструкції систем опалення, вентиляції, кондиціонування, водопостачання, електропостачання й автоматизованого управління. З практичного погляду розв'язання цієї проблеми передбачає досягнення балансу між капіталовкладеннями й очікуваним енергетичним ефектом, що потребує застосування методів техніко-економічного моделювання, аналізу життєвого циклу інженерних систем та інтеграції принципів енергоаудиту. У науковому контексті завдання оптимізації енергоспоживання охоплює дослідження моделей розподілу навантажень, впливу зовнішніх факторів на стабільність енергетичного балансу, а також розроблення адаптивних алгоритмів керування з урахуванням специфіки конкретних промислових середовищ. Отже, проблема оптимізації енергоефективності в інженерних системах промислових об'єктів інтегрує теоретичні й прикладні завдання, реалізація яких є критично важливою як для науково-технічного поступу, так і для підвищення конкурентоспроможності підприємств у контексті переходу до енергоощадної економіки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Аналіз сучасних досліджень з оптимізації енергоефективності в інженерних системах промислових об'єктів дає змогу виокремити чотири основні змістові напрями.

Перший напрям передбачає технічну модернізацію систем електропостачання й компенсацію реактивної потужності. У роботі С. М. Балюти, В. Д. Йовбака, Л. О. Копилової та Ю. В. Куєвди [1] вивчено підходи до компенсації реактивної потужності на промислових і цивільних об'єктах з урахуванням ефективності розміщення й конфігурації компенсувальних пристроїв. Г. Гурліс (G. Gourlis) та І. Ковачич (I. Kovacic) [2] наголошують на ролі інженерно-будівельної інфраструктури в загальній схемі енергоспоживання,

акцентуючи потребу залучення будівель до процесів енергооптимізації. У праці К. Геллінгса (C. W. Gellings) [3] детально розглянуто трансформацію електромереж у смартсистеми, що забезпечують інтерактивне управління енергопотоками для зменшення пікових навантажень. Перспективним у цьому напрямі є подальше вивчення впровадження автоматизованих систем контролю параметрів електроспоживання в реальному часі.

Представники другого напрямку зосереджують увагу на теплотехнічній інтеграції й термодинамічній оптимізації машинобудівних систем. У публікації Л. А. Проца, Ю. І. Фордзюна та Є. М. Лютого [4] обґрунтовано ефективність поєднання теплових процесів у рамках єдиної енергетичної системи підприємства, що дає змогу зменшити витрати палива й підвищити загальний ККД. Д. Маріано-Ернандес (D. Mariano-Hernández), Л. Ернандес-Кальехо (L. Hernández-Callejo), А. Зоріта-Ламадрид (A. Zorita-Lamadrid), О. Дуке-Перес (O. Duque-Pérez), Ф. Гарсія (F. García) [5] аналізують методи прогнозного управління й виявлення несправностей для забезпечення сталого функціонування теплових систем будівель. У дослідженні М. Кратті (M. Krarti) [6] запропоновано інженерний підхід до проведення енергоаудиту з акцентом на виявлення теплових утрат. Перспективним є вдосконалення моделей когенерації та систем відновлення теплоти в умовах змінного навантаження на промислових підприємствах.

Третій напрям присвячено впровадженню інтелектуальних технологій, цифрових двійників і концепцій Industry 4.0 в управління енергоефективністю. У праці Ф. Мацунаги (F. Matsunaga), В. Житковські (V. Zytkowski), П. Валле (P. Valle), Ф. Дешампса (F. Deschamps) [7] доведено ефективність застосування кіберфізичних систем для моніторингу й оптимізації енергоспоживання на виробництві. В. Ю (W. Yu), П. Патрос (P. Patros), Б. Янг (B. Young), Е. Клінак (E. Klinac), Т. Г. Волмслі (T. G. Walmsley) [8] запропонували класифікацію цифрових двійників для промислової енергетики, підкреслюючи їхню здатність до адаптації в умовах мінливого середовища. А. Катал (A. Katal), С. Дахія (S. Dahiya), Т. Чаудгарі (T. Choudhury) [9] досліджують програмні засоби підвищення енергоефективності в дата-центрах як значних споживачів енергії.

У роботі Г. Фарзане (H. Farzaneh), Л. Малемірчегіні (L. Malehmirchegini), А. Бежана (A. Bejan), Т. Афолабі (T. Afolabi), А. Мулумбі (A. Mulumba), П. П. Даки (P. P. Daka) [10] описано застосу-

вання штучного інтелекту в смартбудівлях для управління кліматом, освітленням і споживанням електроенергії. Л. Белуссі (L. Belussi), Б. Бароцці (B. Barozzi), А. Беллацці (A. Bellazzi), Л. Данца (L. Danza), А. Девітофранческо (A. Devitofrancesco), К. Фанчуллі (C. Fanciulli), М. Геллере (M. Ghellere), Д. Гуадзі (G. Guazzi), І. Мероні (I. Meroni), Ф. Саламоне (F. Salamone), Ф. Скамоні (F. Scamoni), К. Скрозаті (C. Scrosati) [11] розглянули інноваційні рішення для досягнення нульового енергоспоживання в будівлях, які можуть інтегруватися в промислові комплекси. Перспективним є розвиток гібридних систем на базі цифрових двійників та алгоритмів ШІ для комплексного управління промисловими енергооб'єктами.

Четвертий напрям стосується системного оцінювання енергоспоживання, управління якістю технологічних процесів і впливу смарттехнологій на економічну ефективність. У дослідженні Г. І. Канюка, А. Ю. Мезері, Т. Ю. Василець, С. М. Келеберди, А. С. Пономаренка, Д. О. Чирочкіна [12] запропоновано методологію оцінювання якості енергоспоживання за допомогою багатфакторного аналізу. У роботі М. Б. Паласевича, О. В. Савки й Т. А. Лепак [13] досліджено вплив цифровізації на підвищення енергоефективності економіки через упровадження смартрішень.

У праці А. Тумана (A. Thumann) і Д. П. Мехти (D. P. Mehta) [14] систематизовано інженерні рішення й етапи впровадження енергоменеджменту на підприємствах. У публікації Дж. Хоссейна (J. Hossain), А. Ф. Кадіра (A. F. Kadir), А. Н. Ханафі (A. N. Hanafi), Х. Шаріфа (H. Shareef), Т. Хатіба (T. Khatib), К. А. Бахаріна (K. A. Baharin), М. Ф. Сулайми (M. F. Sulaima) [15] узагальнено практики управління енергією в комерційних і багатофункціональних будівлях переважно промислового призначення. М. Павловський (M. Pavlovskiy) [16] вивчив можливості підвищення паливної ефективності дизельних двигунів за рахунок використання біопалив, що має значення для енергомодернізації транспортної та допоміжної інфраструктури промислових підприємств. Перспективним є подальше дослідження інтеграції енергетичного моніторингу із загальною системою стратегічного управління підприємством.

Попри наявність значної кількості праць, присвячених питанням енергоефективності в промисловості, залишаються невирішеними кілька ключових аспектів. Зокрема, недостатньо досліджено специфіку реалізації принципів енергозбе-

реження з урахуванням функціонального призначення різних типів інженерних систем. Методи оцінювання енергоефективності досі спираються на фрагментарні підходи, які або не враховують динамічних режимів роботи, або не інтегруються з інтелектуальними технологіями моніторингу. Також наявна нормативна невідповідність між вимогами сучасної цифрової промисловості й чинною базою, а практичні механізми енергоменеджменту слабо впроваджені через відсутність адаптованих моделей управління та брак інвестиційно орієнтованих рішень.

Запропоноване дослідження спрямовано на усунення цих прогалин шляхом комплексного аналізу принципів енергозбереження, узагальнення методичних основ оцінювання ефективності, вивчення можливостей інтелектуального керування й формування цілісної моделі модернізації. Застосування аналітичного підходу до нормативної бази, адаптація цифрових рішень та орієнтація на практичну реалізацію запропонованих заходів дають змогу значно розширити наукове розуміння проблеми й запропонувати конкретні інструменти для її вирішення на рівні підприємств.

Постановка завдання. Мета статті – дослідити особливості функціонування інженерних систем промислових об'єктів у контексті енергоефективності, оцінити потенціал їх оптимізації з урахуванням технічних та економічних чинників і сформулювати практичні рекомендації щодо зниження енергетичних витрат у виробничому середовищі.

Завдання статті:

1. Проаналізувати принципи енергозбереження й підходи до оцінювання енергоефективності інженерних систем промислових підприємств з урахуванням функціональної специфіки, умов експлуатації та нормативно-технічної бази.

2. Дослідити ефективність інтелектуальних технологій моніторингу й управління як засобів оптимізації енергоспоживання в промисловому середовищі.

3. Виявити системні бар'єри підвищення енергоефективності та сформулювати рекомендації щодо модернізації інженерної інфраструктури за допомогою енергоощадних рішень і фінансових механізмів підтримки.

Виклад основного матеріалу. Оптимізація енергоспоживання в інженерних системах промислових підприємств ґрунтується на впровадженні цілісних принципів енергозбереження, які відображають технічні, технологічні й організаційно-експлуатаційні аспекти. Ці принципи

є складником системного підходу до підвищення енергоефективності, оскільки дають змогу забезпечити узгодженість роботи енергетичних підсистем підприємства з урахуванням їх функціонального навантаження, змінних умов виробничого циклу й зовнішнього середовища. Реалізація принципів енергозбереження не є уніфікованою: вона варіюється залежно від типу системи (опалення, вентиляції, електропостачання, водопостачання), технічного ресурсу обладнання, автоматизації процесів і рівня енергоменеджменту. Узагальнену характеристику основних принципів енергозбереження, реалізованих в інженерних системах промислових об'єктів, подано в таблиці 1.

Реалізація зазначених принципів енергозбереження відображає перехід промислових підприємств від фрагментарного управління енерговитратами до системного підходу на основі технологічної адаптивності й цифрової інтеграції. Наприклад, дотримання принципу відповідності потужності споживанню дає змогу зменшити пікові навантаження на мережу, що не лише знижує витрати на електроенергію, а й подовжує ресурс роботи електрообладнання. В умовах усе вищих тарифів і нестабільності енергопостачання це має безпосередній економічний ефект. Теплоізоляційна ефективність виявляється особливо значущою для підприємств із тривалими теплотехнологічними циклами, де навіть незначні втрати тепла можуть призвести до суттєвого зниження коефіцієнта корисної дії системи. Принцип регулювання в реальному часі, що базується на застосуванні сенсорних модулів та адаптивних алгоритмів, відкриває можливості для так званого

предиктивного керування, коли система прогнозує зміну умов і реагує на них ще до появи перевитрат. Застосування рекуперації енергії в українських промислових умовах нині активно розвивається, зокрема, у харчовій, металургійній і деревообробній галузях, де надлишкове тепло або тиск конвертується в корисну енергію для допоміжних потреб. Комплексна автоматизація, яка впроваджується через SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)- і MES (Manufacturing Execution System)-рішення [17], є не лише інструментом контролю, а й аналітичним засобом для визначення неефективних зон, моделювання сценаріїв навантаження й оптимізації графіків роботи технологічного обладнання [9]. Усі ці механізми демонструють, що сучасні принципи енергозбереження реалізуються не ізольовано, а в рамках інтегрованих рішень, які враховують як технічну логіку процесів, так й економічну доцільність їх впровадження.

Оцінювання енергоефективності інженерних систем у промисловості є багаторівневим процесом, що передбачає інтеграцію технічних, нормативно-методичних та економічних інструментів. В умовах трансформації енергетичної політики й цифровізації виробничих процесів актуалізується потреба не лише кількісного вимірювання спожитих енергоресурсів, а й визначення ефективності використання енергії в контексті досягнення функціональних і технологічних цілей. Підходи до оцінювання базуються на поєднанні показників питомого енергоспоживання, коефіцієнтів корисної дії, енергетичних балансів, а також аналізу відхилень від нормативних зна-

Таблиця 1

Принципи енергозбереження в інженерних системах промислових підприємств

Принцип енергозбереження	Зміст принципу	Особливості реалізації в інженерних системах промислових об'єктів
Відповідність потужності споживанню	Мінімізація надлишкової енергії шляхом балансування потужностей і навантажень	Застосовується в системах електропостачання, вентиляції, привідних механізмах
Теплоізоляційна ефективність	Зменшення тепловтрат за рахунок сучасних ізоляційних матеріалів і конструкцій	Актуально для тепломереж, паропроводів, емностей із теплоносіями
Регулювання в реальному часі	Динамічне налаштування параметрів роботи систем відповідно до змін умов	Реалізується через автоматику в системах HVAC, насосних станціях, освітленні
Рекуперація енергії	Повернення частини енергії з відпрацьованих потоків у виробничий цикл	Застосовується у вентиляції, теплогенерації, системах стисненого повітря
Комплексна автоматизація	Централізоване управління енергоресурсами для зменшення втрат	Реалізується через SCADA-системи, енергетичні модулі ERP, промислові контролери

Джерело: сформовано на основі [1; 2; 3; 7; 14]

чень. У сучасній практиці широко застосовуються як традиційні методи розрахунку, так й автоматизовані системи енергомоніторингу, що забезпечують оперативний контроль параметрів і прогнозування енергетичних утрат. Основні підходи до оцінювання енергоефективності узагальнено в таблиці 2.

У сучасних умовах вітчизняної промисловості, що працює в режимі ресурсної економії й технологічного оновлення, найбільш ефективною виявляється саме поєднана модель оцінювання. Автоматизований моніторинг дає змогу фіксувати зміну навантажень та оперативно реагувати на відхилення, тоді як енергетичний аудит забезпечує глибинну діагностику і створення основи для довгострокового планування модернізації. У разі систем опалення й вентиляції нормативно-розрахунковий підхід дає змогу зіставити проєктні теплові потужності з реальними умовами експлуатації. Індикативне оцінювання широко застосовується в енергоємних галузях, зокрема металургії, де зіставлення питомих показників дає уявлення про ефективність цехів і технологій.

На окрему увагу заслуговує чинна нормативно-методична база, яка є основою для нормативно-розрахункових методів оцінювання енергоефективності. Зокрема, застосовується ДБН В.2.5-39:2008 «Інженерне обладнання будівель і споруд. Теплова ізоляція та енергозбереження» [18], яка визначає вимоги до проєктування теплової ізоляції систем, однак не враховує впливу динамічних режимів енергоспоживання в умовах промислової експлуатації. ДСТУ ISO 50001:2020 «Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування» [19] забезпечує

методологічну основу для впровадження політики енергоуправління, проте не адаптований до цифрових інструментів оперативного контролю та прогнозування. Додатково застосовуються галузеві методики енергетичного аудиту, затверджені Держенергоефективності [20], які базуються переважно на статичних коефіцієнтах утрат і питомих витрат. Виявлено, що ці документи мають обмежену функціональність у контексті інтеграції з автоматизованими системами моніторингу (SCADA, IoT) та аналітичними платформами штучного інтелекту, що гальмує адаптацію нормативів до реальних умов функціонування цифровізованої промислової інфраструктури. Така невідповідність між регуляторними підходами й технологічними можливостями формує бар'єри для впровадження гнучкого енергоменеджменту, який базується на змінних профілях навантаження, прогнозних моделях та оперативному реагуванні на енергетичні ризики [14].

У сучасній промисловості інтелектуальні технології моніторингу й контролю стали невід'ємною частиною систем енергоефективного управління, оскільки забезпечують оперативну обробку даних, адаптивне регулювання навантажень і запобігання енергетичним утратам. На відміну від традиційних систем обліку, ці рішення дають змогу в реальному часі відстежувати зміну параметрів, аналізувати тренди, будувати прогнози споживання та приймати оптимізаційні рішення без залучення операторів. Особливо актуальним є використання таких технологій на об'єктах із високим енергоспоживанням, складною конфігурацією інженерної інфраструктури й потребою в гнучкому енергетичному балансу-

Таблиця 2

Підходи до оцінювання енергоефективності інженерних систем у промисловості

Підхід до оцінювання	Ключова характеристика	Галузь застосування й функціональна роль
Нормативно-розрахунковий	Порівняння фактичного споживання з нормативами, установленними для об'єкта	Оцінювання відповідності проєктних і фактичних показників у системах опалення, вентиляції
Енергетичний аудит	Комплексне обстеження об'єкта з аналізом утрат, неефективних зон, потенціалу економії	Застосовується під час модернізації підприємств і розроблення енергетичних паспортів
Індикативне оцінювання	Аналіз питомих витрат енергії на одиницю продукції або послуги	Дає змогу порівнювати ефективність між різними об'єктами одного типу
Коефіцієнтна модель	Розрахунок ККД, коефіцієнтів енерговикористання, тепловтрат, навантаження	Застосовується для аналізу динаміки показників у часі та виявлення неефективних режимів
Автоматизований енергомоніторинг	Збирання й аналіз даних у реальному часі із застосуванням сенсорних систем і SCADA	Підтримує оперативне управління та прийняття рішень на основі даних

Джерело: сформовано на основі [4; 5; 6; 12; 13]

ванні. Основні інструменти й ефекти їх застосування подано в таблиці 3.

Під час практичної реалізації на промислових підприємствах ці технології створюють основу для переходу від реактивного до превентивного управління енергетичними потоками. Зокрема, системи енергомоніторингу з інтеграцією в SCADA дають змогу здійснювати багатофакторний контроль енергоспоживання не лише за обсягами, а й за якістю, піковими навантаженнями та рівнем утрат у конкретних ділянках мережі. Застосування AI-платформ у комбінації з даними із сенсорної інфраструктури забезпечує прогнозне керування, яке допомагає уникати надмірного енергоспоживання ще до його виникнення. У цехах із високою варіативністю технологічних режимів адаптивні системи керування виявляються особливо ефективними, оскільки здатні змінювати параметри роботи в реальному часі залежно від змін внутрішнього мікроклімату, графіка навантаження або зовнішніх погодних умов [7]. Усе це сприяє формуванню гнучких і самооптимізувальних виробничих середовищ, що відповідають принципам промисловості 4.0 і дають змогу зменшити не лише енергетичні витрати, а й загальні експлуатаційні витрати підприємства.

Підвищення енергоефективності інженерних систем промислових об'єктів суттєво ускладнюється низкою структурних і функціональних бар'єрів, що формують інерційне середовище виробничої інфраструктури. Однією з головних перешкод залишається технічна застарілість основних фондів, яка не дає змоги ефективно впроваджувати сучасні регуляційні й автоматизовані рішення без масштабної реконструкції систем [4].

Обладнання, розроблене в умовах інших енергетичних стандартів, має високий рівень утрат, обмежену сумісність із цифровими інструментами контролю та не підтримує адаптивних режимів роботи [7]. Водночас обмежений доступ до фінансування, характерний для більшості вітчизняних промислових підприємств, не дає можливості реалізувати повноцінні модернізаційні програми, орієнтовані на глибоку трансформацію енергетичної інфраструктури [12]. Інвестиції переважно спрямовуються на підтримання базової функціональності, що знижує гнучкість систем управління та їхню здатність до оптимізації. Недосконалість нормативної бази, яка не завжди враховує специфіку сучасних технологій енергообліку й управління, також гальмує розвиток енергоефективних рішень [5]. Чинні регламенти часто не мають механізмів адаптації до змін середовища або стимулювання підприємств до запровадження інновацій. Додатково ситуацію ускладнює невисокий рівень інтеграції енергоменеджменту в систему стратегічного управління підприємством. Відсутність єдиної інформаційної бази, розосередження відповідальності за енергоспоживання між різними службами й недооцінювання енергетичних показників у структурі операційної ефективності призводять до фрагментарності управлінських рішень.

Модернізація інженерних систем промислових об'єктів має базуватися на системному впровадженні енергоощадного обладнання, цифрових технологій управління й ефективних механізмів фінансування, що дають змогу забезпечити довгострокову економічну доцільність енергоефективних рішень. Одним із ключових напрямів є заміна застарілих агрегатів на високоефективні

Таблиця 3

Інтелектуальні технології моніторингу й контролю в системах енергоефективного управління

Технологія/інструмент	Принцип дії та функціональність	Вплив на енергоефективність
Системи автоматизованого енергомоніторингу	Постійне збирання, оброблення та передача даних зі споживчих точок у режимі реального часу	Скорочення втрат, оперативне виявлення неефективних зон, контроль пікових навантажень
Інтелектуальні сенсори й IoT-рішення	Вимірювання параметрів (температура, тиск, струм, витрати) з високою точністю	Підвищення точності управління, зниження надлишкового споживання ресурсів
SCADA-системи з функціями аналітики	Візуалізація даних, дистанційне керування, аналіз трендів і моделювання сценаріїв	Забезпечення стабільності режимів, запобігання збоєм і перенавантаженням
AI-платформи для енергетичного прогнозування	Алгоритми машинного навчання для аналізу історичних даних і прогнозування майбутніх потреб	Оптимізація графіків навантаження, зменшення витрат на енергоносії
Системи адаптивного управління	Динамічне коригування параметрів роботи систем за зміною зовнішніх і внутрішніх умов	Автоматичне зниження споживання без втрати продуктивності систем

Джерело: сформовано автором на основі [8; 9; 10; 11; 15]

установки з регульованими приводами, енергозберігальними теплообмінниками, сенсорним керуванням і низькими втратами в режимах часткового навантаження. Доцільність таких рішень має підтверджуватися розрахунками скорочення питомого енергоспоживання, строків окупності й ефекту життєвого циклу. Упровадження автоматизованого управління передбачає інтеграцію SCADA-систем, технологій IoT і машинного навчання, що дає змогу здійснювати моніторинг, діагностику й оптимізацію роботи систем у режимі реального часу. На рівні керування підприємством важливим є поєднання технічної модернізації з розгортанням енергоменеджменту на основі стандартизованих підходів (наприклад, ISO 50001 [19]), що забезпечує постійне вдосконалення енергетичної політики. Фінансування таких ініціатив доцільно здійснювати через залучення цільових кредитних програм, енергосервісних контрактів (ESCO) або міжнародних донорських інструментів, що передбачають повернення інвестицій за рахунок досягнутої економії енергоресурсів. Важливою умовою є супровід кожного проекту аналітичним інструментарієм для оцінювання ефективності на етапі планування, реалізації та експлуатації. Усі ці заходи мають бути не ізольованими, а частиною цілісної стратегії, що враховує технологічну специфіку об'єкта, економічні обмеження й потребу в гнучкому управлінні енергетичними потоками.

Висновки. Під час дослідження встановлено, що підвищення енергоефективності інженерних систем промислових об'єктів потребує цілісного підходу, який поєднує технічну модернізацію, цифровізацію управління й економічну доцільність упроваджених рішень. Обґрунтовано ефективність принципів енергозбереження, таких як балансування навантажень, теплоізоляція, рекуперація, адаптивне регулювання й автоматизоване керування. Узагальнено актуальні підходи до оцінювання енергоефективності, серед яких найбільш результативним є поєднання енергетичного аудиту з автоматизованим моніторингом та аналітичними моделями. Доведено, що інтелектуальні технології – SCADA, IoT-сенсори, AI-платформи – формують основу для переходу до превентивного управління енергоспоживанням. Виявлено основні перешкоди: технічну застарілість систем, обмежене фінансування, фрагментарність енергоменеджменту й неадаптованість нормативної бази. Запропоновано впровадження енергоощадного обладнання, стандартизованих систем управління й механізмів фінансування на основі енергосервісу.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробленням адаптивних цифрових моделей управління енергоспоживанням, інтеграцією AI в промислову енергетичну аналітику й удосконаленням регуляторних підходів до стимулювання інновацій у сфері енергоефективності.

Список літератури:

1. Балюта С. М., Йовбак В. Д., Копилова Л. О., Куєвда Ю. В. Компенсація реактивної потужності в системах електрозабезпечення промислових і цивільних об'єктів. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2021. Вип. 27, № 4. С. 117–128. URL: <https://surl.li/tjnuqp> (дата звернення: 06.06.2025).
2. Gourlis G., Kovacic I. Energy efficient operation of industrial facilities: The role of the building in simulation-based optimization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 410, № 1. Article 012019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/410/1/012019>.
3. Gellings C. W. The smart grid: enabling energy efficiency and demand response. *River Publishers*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003151524>.
4. Проц Л. А., Фордзюн Ю. І., Лютий Є. М. Інтеграція теплотехнічних процесів у проектування енергоефективних машинобудівних систем. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2025. Вип. 1, № 92. С. 190–197. DOI: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.24>.
5. Mariano-Hernández D., Hernández-Callejo L., Zorita-Lamadrid A., Duque-Pérez O., García F. A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. Article 101692. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101692>.
6. Krarti M. Energy audit of building systems: an engineering approach. *CRC Press*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003011613>.
7. Matsunaga F., Zytowski V., Valle P., Deschamps F. Optimization of energy efficiency in smart manufacturing through the application of cyber-physical systems and industry 4.0 technologies. *Journal of Energy Resources Technology*. 2022. Vol. 144, № 10. Article 102104. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4053868>.
8. Yu W., Patros P., Young B., Klinac E., Walmsley T. G. Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 161. Article 112407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407>.

9. Katal A., Dahiya S., Choudhury T. Energy efficiency in cloud computing data centers: a survey on software technologies. *Cluster Computing*. 2023. Vol. 26. P. 1845–1875. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10586-022-03713-0>.
10. Farzaneh H., Malehmirchegini L., Bejan A., Afolabi T., Mulumba A., Daka P. P. Artificial intelligence evolution in smart buildings for energy efficiency. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 2. Article 763. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11020763>.
11. Belussi L., Barozzi B., Bellazzi A., Danza L., Devitofrancesco A., Fanciulli C., Ghellere M., Guazzi G., Meroni I., Salamone F., Scamoni F., Scrosati C. A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 25. Article 100772. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100772>.
12. Канюк Г. І., Мезеря А. Ю., Василець Т. Ю., Келеберда С. М., Пономаренко А. С., Чирочкін Д. О. Оптимізація показників якості технологічних процесів об'єктів керування в енергетиці. *Машинобудування*. 2024. Вип. 32. С. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.32820/2079-1747-2023-32-55-63>.
13. Паласевич М. Б., Савка О. В., Лепак Т. А. Вплив смарт-технологій на економічний розвиток та підвищення енергоефективності національної економіки. *Академічні візії*. 2024. Вип. 34. URL: <https://www.academy-vision.org/index.php/av/article/view/129> (дата звернення: 06.06.2025).
14. Thumann A., Mehta D. P. Handbook of energy engineering. *River Publishers*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003151715>.
15. Hossain J., Kadir A. F., Hanafi A. N., Shareef H., Khatib T., Baharin K. A., Sulaima M. F. A review on optimal energy management in commercial buildings. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 4. Article 1609. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16041609>.
16. Pavlovskiy M. The Improvement of Fuel Efficiency and Environmental Characteristics of Diesel Engine by Using Biodiesel Fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds) *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*. 2024. Vol. 510. Springer, Cham. P. 43–55. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4.
17. MES vs SCADA in Industry 4.0 – Differences and meanings. Nexus Integra: вебсайт. URL: <https://nexusintegra.io/mes-vs-scada/> (дата звернення: 05.06.2025).
18. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Теплова ізоляція та енергозбереження. Мінрегіон України : вебсайт. URL: <https://surl.li/fgqwrp> (дата звернення: 05.06.2025).
19. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування. УкрНДНЦ : вебсайт. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=90178 (дата звернення: 05.06.2025).
20. Методичні рекомендації з проведення енергоаудиту будівель. ESAVE: вебсайт. URL: <https://www.esave.com.ua/service/energoaudit-budivli> (дата звернення: 05.06.2025).

Krymska A.O., Didok V.Yu., Stoliarchuk V.V. OPTIMIZATION OF ENERGY EFFICIENCY IN ENGINEERING SYSTEMS OF INDUSTRIAL FACILITIES

The relevance of the study is determined by the growing need to reduce energy costs in industry against the backdrop of infrastructure wear and tear, rising tariffs, stricter environmental requirements, and the need to ensure the energy stability of production processes. The energy efficiency of engineering systems is considered a strategic resource of an enterprise that affects its competitiveness, operational stability, and long-term economic efficiency.

The aim of the study is to comprehensively analyze the functioning of engineering systems of industrial facilities from the perspective of energy efficiency, to assess the possibilities for their technical and digital modernization, taking into account economic feasibility, and to develop practical recommendations for reducing energy consumption in a production environment.

The research methodology is based on a combination of systematic analysis of the architecture of engineering systems, generalization of approaches to energy monitoring and energy consumption modeling, as well as a critical analysis of the regulatory framework, the potential of automated management technologies, and financial models for modernization. Elements of comparative, factor, and structural-functional analysis were used.

Research results. The principles of energy conservation implemented in modern enterprise systems, in particular load balancing, recuperation, adaptive control, and digital automation, were studied. Approaches to energy efficiency assessment based on normative, indicative, coefficient, and automated analysis were generalized. The effectiveness of intelligent monitoring technologies – SCADA, IoT, AI platforms – for the transition to preventive energy consumption management has been revealed. The key reasons hindering modernization have been identified: outdated equipment, limited access to financing, low level of energy management, and regulatory environment inconsistencies.

Conclusions. It has been proven that energy efficiency can only be improved through a comprehensive approach that includes technical reconstruction and the introduction of adaptive control and energy management in accordance with international standards. The effectiveness of the intellectualization of energy systems for achieving a stable energy balance has been confirmed.

Prospects for further research lie in the development of digital models of adaptive energy consumption management, the integration of machine learning tools for load forecasting, and the improvement of regulatory and methodological foundations for energy efficiency policy in industry.

Key words: *energy management, intelligent monitoring technologies, automated control, technical modernization, energy audit, digital analytics, regulatory framework.*

Дата надходження статті: 20.06.2025

Дата прийняття статті: 27.06.2025

Опубліковано: 27.10.2025