

УДК 005:620.92:614.21

DOI: <https://doi.org/10.30838/EP.212.135-142>**Джеджула В.В.**

доктор економічних наук

Вінницький національний технічний університет

Dzhedzhula Viacheslav

Dr. of Economic Sc.

Vinnytsia National Technical University

<https://orcid.org/0000-0002-2740-0771>**Шевчук Д.Г.**

Вінницький національний технічний університет

Shevchuk Dmytro

Vinnytsia National Technical University

<https://orcid.org/0009-0001-8893-7679>

МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ УПРАВЛІННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯМ НА ПІДПРИЄМСТВАХ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я

У статті розглянуто методичні засади побудови та функціонування системи управління енергозбереженням на підприємствах охорони здоров'я. Обґрунтовано доцільність комплексного підходу із застосуванням регресійної моделі нормалізації теплоспоживання з урахуванням кліматичних факторів, що підвищує точність оцінювання енергоефективності. Запропоновано структурно-функціональну модель системи з інтеграцією інтернету речей (IoT) та керування системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря. Визначено ключові фактори впливу на рівень енергоспоживання та сформовано підходи до їх урахування в управлінських рішеннях. Розроблено рекомендації щодо впровадження СУЕ з урахуванням особливостей експлуатації медичних будівель. Верифікацію виконано на базі медичного центру у м. Вінниця: зниження питомого теплоспоживання становить 29,4 %, чистий приведений дохід (Net Present Value, NPV) = +18,4 млн грн за 10 років.

Ключові слова: енергозбереження, система управління енергозбереженням, охорона здоров'я, регресійна модель, інтернет речей, HVAC, енергоефективність, теплоспоживання.

METHODOLOGICAL FUNDAMENTALS OF ENERGY SAVING MANAGEMENT IN HEALTHCARE ENTERPRISES

The paper addresses the methodological foundations for the development and implementation of an energy management system (EnMS) in healthcare facilities. The relevance of this study is determined by the fact that hospital buildings are among the most energy-intensive structures in the public sector, consuming two to three times more energy per unit area compared to conventional commercial buildings. Healthcare facilities operate continuously around the clock and must maintain stringent indoor climate parameters essential for patient safety and recovery, which imposes significant constraints on energy-saving strategies. In the context of rising energy costs, growing environmental concerns, and the ongoing energy crisis in Ukraine, the development of scientifically grounded methodological approaches to energy conservation management in healthcare enterprises is of critical importance.

The research methodology integrates several complementary approaches. A regression-based normalization model for heat consumption accounting for climatic factors, specifically heating degree days (HDD), has been developed and validated. This model enables accurate baseline energy performance assessment by decoupling the influence of weather variability from operational and building-related factors, thereby improving the reliability of energy efficiency evaluation. The study also employs a structural-functional modeling approach to design the architecture of the energy management system, incorporating Internet of Things (IoT) technologies for real-time monitoring and data-driven control of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems. A comprehensive analysis of key factors affecting energy consumption levels in healthcare buildings has been conducted, including building envelope characteristics, HVAC system configurations, occupancy patterns, medical equipment loads, and operational schedules.

The results demonstrate that the proposed integrated approach enables a systematic identification of energy-saving opportunities while preserving the required microclimate conditions in medical premises. The structural-functional model of the energy management system defines the interaction between monitoring, analysis, decision-making, and control

ISSN друкованої версії: 2224-6282

ISSN електронної версії: 2224-6290

© Джеджула В.В., Шевчук Д.Г., 2026

subsystems, providing a framework for continuous energy performance improvement. The key influencing factors have been ranked and their incorporation into managerial decision-making processes has been formalized. Practical recommendations for EnMS implementation have been developed, taking into account the specific operational requirements of healthcare buildings, including the need for uninterrupted climate control in critical areas such as operating theatres, intensive care units, and sterile zones.

The verification of the proposed methodology was performed using a medical center located in Vinnytsia, Ukraine, as a pilot facility. The implementation results confirm the effectiveness of the approach: the specific heat consumption was reduced by 29.4%, while the Net Present Value (NPV) over a 10-year period amounts to +18.4 million UAH, demonstrating both the energy and economic viability of the proposed system. The findings contribute to the scientific basis for energy-efficient microclimate management in healthcare facilities and can be applied to similar institutions across Ukraine and other countries with comparable climatic and institutional conditions.

Keywords: energy saving, energy management system, healthcare, regression model, Internet of Things, HVAC, energy efficiency, heat consumption.

JEL classification: Q41, Q48, C53.

Постановка проблеми. Заклади охорони здоров'я належать до найбільш енергоємних об'єктів України. За узагальненими даними літературних джерел [1-8], питоме теплоспоживання типової районної лікарні становить 180–250 кВт·год/м²·рік — у 1,5–2 рази більше, ніж у розвинених країнах ЄС. Витрати на енергоносії формують 25–40 % загального кошторису утримання закладу, суттєво обмежуючи фінансування безпосередньо медичної діяльності [1-10].

В умовах постконфліктного відновлення та курсу на енергетичну незалежність, проголошеного Стратегією енергетичної безпеки України до 2035 року, скорочення енергетичних витрат у бюджетному секторі стає завданням державної ваги. Лікарні як об'єкти критичної інфраструктури, що функціонують цілодобово та мають жорсткі вимоги до параметрів мікроклімату, потребують особливого методичного забезпечення управління енергозбереженням, яке б враховувало специфіку галузі.

Водночас практика свідчить, що більшість вітчизняних медичних закладів здійснює управління енергоспоживанням стихійно, без системного підходу, затверджених базових ліній та ключових показників ефективності (EnPI). Це не дозволяє об'єктивно оцінити потенціал заощадження та обґрунтувати доцільність капітальних вкладень в енергозберігаючі заходи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні та методичні засади енергетичного менеджменту закладено у міжнародному стандарті ISO 50001:2018, який регламентує вимоги до систем енергетичного менеджменту та встановлює цикл PDCA (Plan–Do–Check–Act) як методологічну основу. Вітчизняна нормативна база представлена ДСТУ ISO 50001:2014, а також галузевими ДБН В.2.2-10 та ДБН В.2.6-31, що встановлюють вимоги до мікроклімату і теплозахисту будівель закладів охорони здоров'я.

Кількісний аналіз кінцевого енергоспоживання лікарень в Іспанії, проведений Gonzalez et al. (2018) [6-7], засвідчив, що серед будівель третинного сектору в Іспанії саме заклади системи охорони здоров'я мають найвищу енергоємність (5,2 т н.е./ліжка), що суттєво перевищує показники адміністративних будівель та навчальних закладів. Аналогічні висновки щодо надмірного енергоспоживання лікарень підтвердили й дослідження американського контексту: Wawaneh et al.

(2019) [2] встановили, що медичні заклади у США займають 4,8 % загальної площі комерційного сектору, проте споживають 10,3 % загальної енергії цього сектору. За їхніми даними, середня енергоємність американських лікарень становить 738,5 кВт·год/м², що суттєво перевищує аналогічний показник європейських закладів.

Важливим напрямом досліджень є диференціація енергоспоживання за функціональними зонами лікарняних будівель. Aunión-Villa et al. (2021) [1] на прикладі середньої за розміром іспанської лікарні (182 ліжка, 25 177 м²) показали, що системи ОВК та парогенерувальне обладнання споживають 63,0 % енергії, а медичне обладнання — 18,8 %, що сумарно становить 81,8 % загального споживання. При цьому операційні блоки та відділення інтенсивної терапії мали найвищу питому енергоємність — понад 1000 кВт·год/м² на рік. Така нерівномірність розподілу вказує на необхідність зонального підходу до управління енергоспоживанням.

González et al. (2018) [6-7] доповнили цю картину порівняльним аналізом німецьких державних лікарень, застосувавши методологію бенчмаркінгу для оцінювання енергетичної ефективності в розрізі різних типів і розмірів закладів. Garcia-Sanz-Calcedo (2014) [5] у своєму ранньому дослідженні також наголошував на ключовій ролі систематичного аналізу енергоефективності будівель ЗОЗ як передумови для формування дієвих стратегій енергозбереження.

Оглядом дослідження останніх років систематизують накопичений досвід та окреслюють перспективні напрями. У роботі [9] у своєму огляді підкреслюють подвійну природу технічного ретрофітінгу, класифікуючи заходи на пасивні та активні, а також досліджують вплив зовнішніх детермінант — кліматичних факторів та державної політики — на формування моделей енергоспоживання громадських будівель. Psillaki et al. (2023) [10] у систематичному літературному огляді охопили існуючі знання щодо стратегій енергетичного моніторингу, оцінювання та модернізації через технології, стратегії ресурсозбереження та взаємозв'язок між енергоефективністю та якістю надання послуг. Автори наголосили на тому, що через критичний характер роботи лікарень та модель цілодобового медичного обслуговування досягнення скорочення

енергоспоживання є надзвичайно складним завданням.

Разом з тим аналіз наукових публікацій виявляє суттєву невирішену частину проблеми: відсутність адаптованої методики управління енергозбереженням, яка б поєднувала нормалізацію базового рівня споживання за кліматичними умовами, структуровану систему показників ефективності та практичний алгоритм впровадження в умовах обмеженого бюджету і цілодобового режиму роботи медичних закладів України.

Мета статті — розробити методичні основи системи управління енергозбереженням на підприємствах охорони здоров'я, включаючи просту регресійну модель нормалізації теплоспоживання за кліматичними умовами, структурно-функціональну модель СУЕ та алгоритм її впровадження, верифікованих на реальному об'єкті.

Для досягнення мети вирішено такі завдання дослідження:

- проаналізувати стан енергоспоживання у медичних закладах України та визначити ключові напрями його скорочення;
- розробити регресійну модель нормалізації питомого теплоспоживання за градусо-добами опалення (HDD);
- побудувати структурно-функціональну модель СУЕ, адаптовану до умов медичного закладу;

– верифікувати методику на пілотному об'єкті та оцінити економічний ефект від її впровадження.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань застосовано комплекс із загально-наукових методів, зокрема методу системного аналізу (який використано при побудові структурно-функціональної моделі СУЕ та виявленні взаємозв'язків між підсистемами) та методу моделювання - для побудови і валідації регресійної моделі нормалізації теплоспоживання; а також конкретно-наукові методи енергетичного аудиту - для визначення базового рівня споживання та виявлення пріоритетних напрямів економії; метод техніко-економічного аналізу (NPV, IRR, термін окупності) - для оцінки доцільності енергозберігаючих заходів. Інструментальна база дослідження: збір первинних даних здійснювався з використанням системи IoT-моніторингу. Пілотним об'єктом дослідження обрано медичний центр в місті Вінниця.

Виклад основних результатів дослідження. На основі вимог ISO 50001 та аналізу особливостей функціонування медичних закладів розроблено структурно-функціональну модель СУЕ (рис. 1), що реалізує цикл PDCA і складається з чотирьох взаємопов'язаних функціональних блоків: енергетичного аудиту, безперервного моніторингу, аналізу та моделювання, оптимізації режимів роботи.

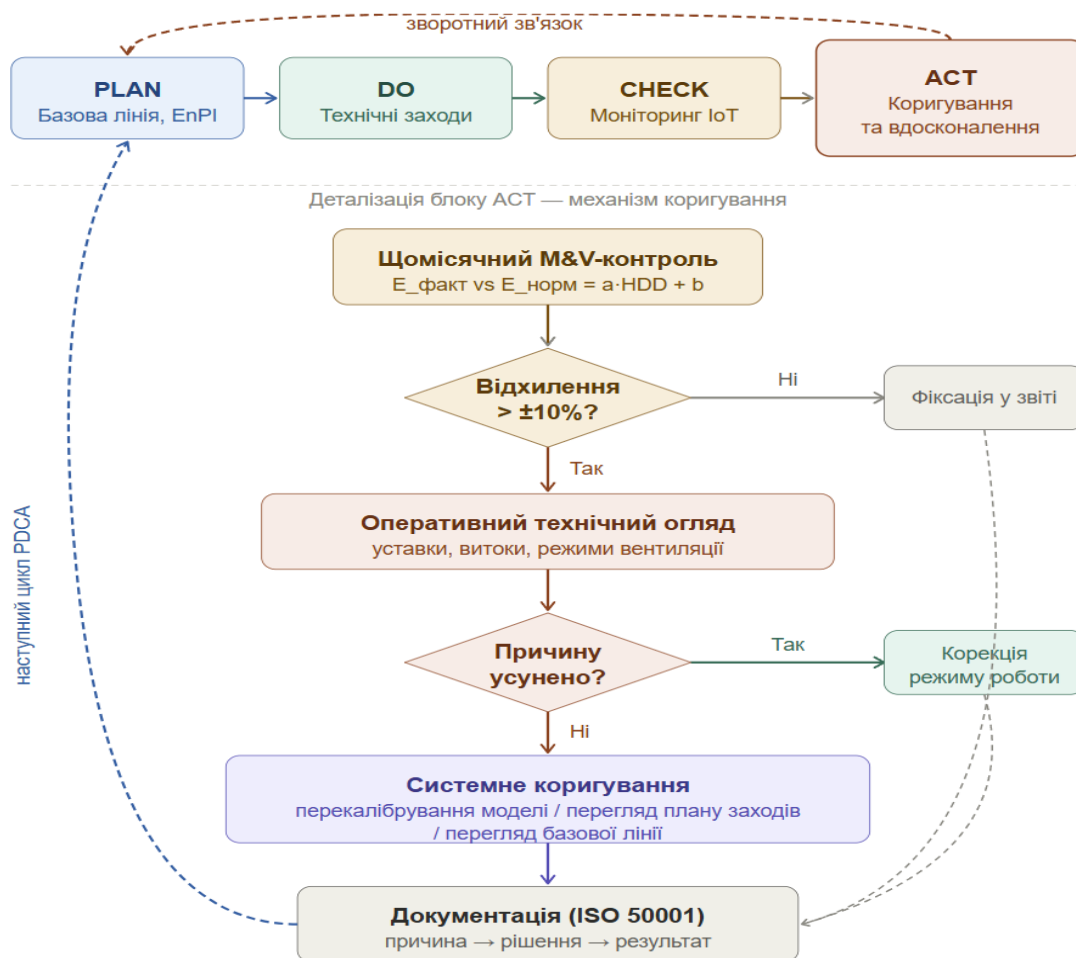


Рис. 1. Структурно-функціональна модель системи управління енергозбереженням підприємства охорони здоров'я
Джерело: розроблено авторами

Модель спирається на три види вхідних даних — фактичні виміри споживання, нормативну базу та фінансово-економічні обмеження — і забезпечує зворотний зв'язок між результатами оптимізації і плануванням заходів.

Блок енергетичного аудиту є вхідною ланкою системи управління енергоефективністю та відповідає етапу Plan у циклі PDCA. Його основне призначення полягає у формуванні цілісної картини енергоспоживання медичного закладу з урахуванням специфіки кожного функціонального підрозділу.

На відміну від типових промислових об'єктів, заклади охорони здоров'я характеризуються нерівномірним розподілом енергоємності між окремими зонами: операційні блоки та відділення інтенсивної терапії споживають від 800 до 1200 кВт·год/м² на рік, тоді як адміністративні приміщення — зазвичай не більше 150–250 кВт·год/м² на рік. Така диференціація вимагає проведення зонального аудиту, за якого кожна функціональна ділянка оцінюється як окремий об'єкт з власними показниками питомого споживання, базовими лініями та потенціалом економії.

У рамках енергетичного аудиту здійснюється інвентаризація основного енергоспоживаючого обладнання, яке у медичних закладах поділяється на три категорії: інженерні системи забезпечення мікроклімату (системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, які формують до 45–60 % загального споживання), медичне обладнання (діагностичне, хірургічне та лабораторне устаткування, що створює значні пікові навантаження) та допоміжні системи (освітлення, ліфтове господарство, системи гарячого водопостачання, побутове обладнання). Для кожної категорії встановлюються індивідуальні показники енергоефективності (EnPI) відповідно до вимог ISO 50001, які стають основою для подальшого порівняльного аналізу та визначення пріоритетних напрямів модернізації.

Важливим елементом аудиту є побудова енергетичного балансу закладу, який відображає співвідношення між придбаною, корисно використаною та втраченою енергією. Складання балансу для лікарні потребує врахування сезонних коливань навантаження, що обумовлені як кліматичними факторами (зміна потреб у опаленні та охолодженні), так і організаційними (варіації кількості пацієнтів, планове обслуговування обладнання, графіки роботи операційних). Результати аудиту оформлюються у вигляді звіту та енергетичного паспорта, який містить інформацію про фактичний стан усіх інженерних систем, відхилення від нормативних вимог ДБН та перелік рекомендованих заходів з оцінкою їх економічної доцільності.

Блок безперервного моніторингу реалізує етап Do циклу PDCA і є технологічним ядром запропонованої моделі. Його архітектура побудована на принципах Інтернету речей та передбачає розгортання розподіленої мережі датчиків, які у реальному часі фіксують ключові параметри: витрату електричної та теплової енергії, температуру та вологість повітря у контрольованих зонах, параметри припливного та витяжного повітря, а також показники якості внутрішнього середовища

(концентрацію CO₂, рівень запиленості, перепад тиску між чистими та загальними зонами).

Для забезпечення надійності та масштабованості системи моніторингу застосовується багаторівнева архітектура збору даних. Нижній рівень формують первинні датчики та лічильники, об'єднані локальними промисловими мережами. Середній рівень становлять контролери-концентратори, що здійснюють первинну обробку сигналів, фільтрацію шумів та перетворення аналогових даних у цифровий формат. Верхній рівень представлений серверною інфраструктурою, де реалізовано зберігання часових рядів, візуалізацію показників та генерацію автоматизованих звітів. Періодичність опитування датчиків диференціюється залежно від динамічності контрольованого параметра: для температури повітря достатнім є інтервал 1–5 хвилин, для електричного навантаження — 15–60 секунд, а для аварійних параметрів (наприклад, перепаду тиску в чистих приміщеннях) передбачається безперервний контроль з генерацією миттєвих сповіщень.

Особливістю моніторингу у медичних закладах є необхідність одночасного відстеження як енергетичних, так і санітарно-гігієнічних параметрів, оскільки будь-яке рішення щодо зменшення енергоспоживання не повинно погіршувати умови перебування пацієнтів та персоналу. Тому система моніторингу інтегрує дані про мікроклімат із даними про енергоспоживання, формуючи єдиний інформаційний простір для прийняття управлінських рішень. Зокрема, контролюється відповідність параметрів повітряного середовища вимогам ДБН В.2.2-10 та ДСТУ EN ISO 14644, що дозволяє оперативно виявляти ситуації, коли зниження енергоспоживання досягається за рахунок неприпустимого відхилення мікрокліматичних показників.

Блок аналізу та моделювання відповідає етапу Check і забезпечує перетворення масивів первинних даних моніторингу у аналітичну інформацію, придатну для прийняття обґрунтованих управлінських рішень. Ключовим інструментом аналізу є побудова регресійних моделей енергоспоживання, які встановлюють кількісні залежності між обсягами спожитої енергії та впливовими факторами: зовнішньою температурою (через показник градусо-днів опалення та охолодження), завантаженістю закладу (кількість ліжок-днів, кількість хірургічних втручань), режимами роботи інженерних систем та іншими змінними.

Регресійна модель загального виду $E = f(HDD, CDD, N_{bed}, N_{op}, S, \dots)$ будується на підставі ретроспективних даних за період не менше двох-трьох опалювальних сезонів. У цьому виразі E позначає загальне енергоспоживання закладу за розрахунковий період, HDD та CDD — градусо-добу опалення та охолодження відповідно, N_{bed} — кількість зайнятих ліжок-днів, N_{op} — кількість проведених оперативних втручань, S — опалювану площу будівлі. Параметри моделі визначаються методом найменших квадратів із подальшою верифікацією за коефіцієнтом детермінації R^2 та середньоквадратичною похибкою $CV(RMSE)$. Модель вважається адекватною при $R^2 \geq 0,75$ та $CV(RMSE) \leq 25\%$ для місячних даних.

Окрім регресійного аналізу, блок моделювання передбачає використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) для дослідження повітряних потоків у критичних зонах медичного закладу — насамперед в операційних залах та палатах інтенсивної терапії. Чисельне моделювання дозволяє оцінити ефективність різних схем повітророзподілу, визначити зони стагнації та потенційного перехресного забруднення, а також обґрунтувати мінімально необхідну кратність повітрообміну для забезпечення нормативних вимог за умови мінімального енергоспоживання. Результати CFD-моделювання використовуються для побудови сурогатних моделей, які суттєво скорочують обчислювальні витрати при проведенні багатокритеріальної оптимізації.

Додатковим аналітичним інструментом є бенчмаркінг — порівняння питомих показників енергоспоживання досліджуваного закладу з аналогічними установами та нормативними орієнтирами. Для цього

використовуються нормалізовані індикатори: споживання на одиницю площі (кВт·год/м²·рік), на одне ліжко-місце (кВт·год/ліжко·рік), на одного працівника (кВт·год/особу·рік). Порівняння здійснюється як із внутрішньою базовою лінією (визначеною за результатами початкового аудиту), так і з зовнішніми еталонами, зокрема показниками програми ENERGY STAR для лікарень. Результати бенчмаркінгу дають змогу об'єктивно оцінити позицію закладу серед аналогів та визначити реалістичний потенціал енергозбереження.

Основна методична проблема оцінки ефективності заходів з енергозбереження полягає в тому, що фактичне теплоспоживання суттєво залежить від кліматичних умов поточного сезону. Для усунення цього ефекту запропоновано просту лінійну регресійну модель залежності питомого місячного теплоспоживання E (кВт·год/м²·міс) від показника градусо-днів опалення HDD (°C·доба/міс):

$$E = a \times HDD + b \quad (1)$$

де

a — регресійний коефіцієнт, що характеризує кліматичну чутливість системи опалення, кВт·год/(м²·°C·доба);
 b — базове споживання, що не залежить від температури зовнішнього повітря (гаряче водопостачання, вентиляція в теплий період тощо), кВт·год/м²·міс.

Коефіцієнти моделі визначаються методом найменших квадратів за 24–36 місяців даних базового

(доінвестиційного) періоду. Показник HDD розраховується за формулою:

$$HDD = \sum_{j=1}^N \max(t_{баз} - t_{зовн,j}; 0) \quad (2)$$

де

$t_{баз} = 18$ °C — базова температура опалення;
 $t_{зовн,j}$ — середньодобова температура зовнішнього повітря в день j (за даними метеостанції або IoT-датчика зовнішньої температури).

Нормалізоване теплоспоживання для порівняння різних опалювальних сезонів розраховується як:

$$E_{норм} = a \cdot HDD_{реф} + b \quad (3)$$

де

$HDD_{реф}$ — градусо-добы опалення референтного (середнього багаторічного) кліматичного року для конкретного регіону.

За даними системи IoT-моніторингу медичного центру міста Вінниці за 2022–2023 рр. (базовий рік) отримано такі значення коефіцієнтів: $a = 0,058$ кВт·год/(м²·°C·доба); $b = 9,5$ кВт·год/м²·міс; коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,961$, що підтверджує достатню точність моделі для практичного застосування.

На рис. 2 наведено рівняння регресії та результати верифікації моделі на фактичних даних.

Модель (1) застосовується у двох ключових завданнях СУЕ. По-перше, для встановлення нормалізованої базової лінії, яка є точкою відліку при оцінці ефекту від заходів. По-друге, для поточного M&V-контролю

(Measurement & Verification): щомісяця нормалізоване споживання порівнюється з фактичним, і відхилення понад ± 10 % ініціює позаплановий технічний огляд.

На основі результатів енергетичного аудиту та аналізу регресійної моделі визначено чотири пріоритетні напрями скорочення енергоспоживання на пілотному об'єкті. У табл. 1 наведено перелік заходів із зазначенням питомої економії та терміну окупності. Джерело: розраховано авторами за матеріалами енергетичного аудиту (2023–2024 рр.). NPV розраховано при ставці дисконту $r = 12$ %.

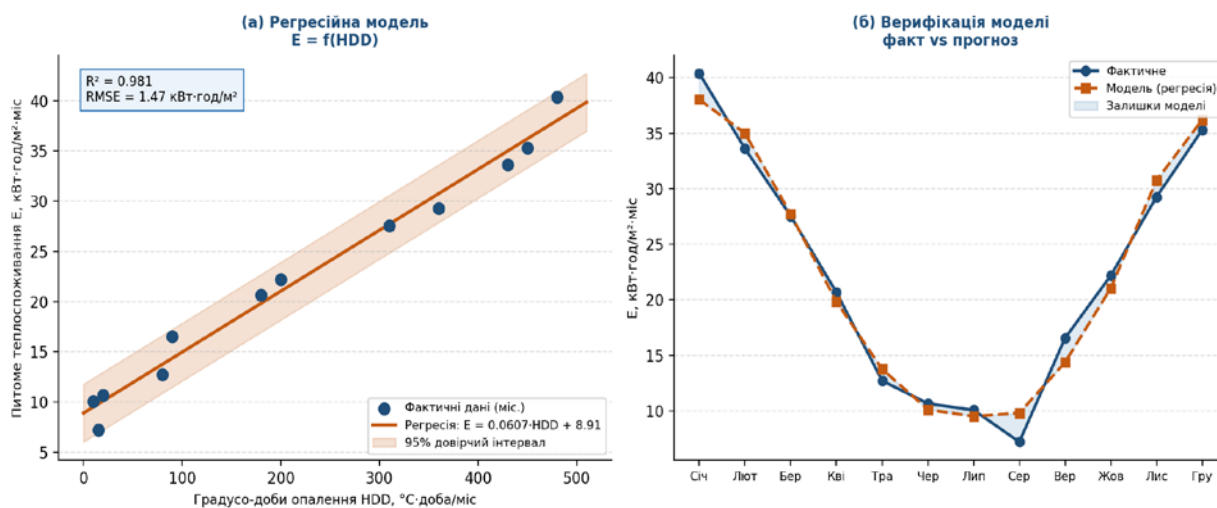


Рис. 2. Регресійна модель нормалізації теплоспоживання: (а) рівняння регресії з довірчим інтервалом; (б) верифікація на фактичних даних

Джерело: розроблено авторами

Таблиця 1

Заходи з енергозбереження та їх техніко-економічні показники (пілотний об'єкт)

Захід	Витрати, тис. грн	Економія, кВт·год/м²·рік	NPV, млн грн (10 р.)	T _{ок} , роки
Утеплення фасадів і горища (мін. плита 150 мм)	3 420	38 → 28	+6,1	4,8
Рекуперация теплоти вентиляційних викидів (η = 72 %)	2 180	22 → 12	+4,3	4,1
Автоматизация HVAC (погодозалежне регулювання, BAS)	1 650	35 → 24	+5,8	3,7
LED-освітлення + датчики руху	980	18 → 11	+2,8	2,9
IoT-моніторинг і облік (47 датчиків, MQTT)	420	–	+1,4	1,8
ВСЬОГО / СЕРЕДНЄ	8 650	218 → 154 (–29,4 %)	+18,4	4,2

Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень

На рис. 3 наведено порівняльну діаграму питомого споживання теплової та електричної енергії до і після впровадження заходів у розрізі кожного напрямку. Максимальний ефект досягається від утеплення огорожуючих конструкцій (–26 %) та автоматизації HVAC-систем (–31 %), що узгоджується з даними аналогічних проектів у країнах ЄС.

Сукупний економічний ефект становить: зниження питомого теплоспоживання з 218 до 154 кВт·год/м²·рік (–29,4 %); щорічна економія коштів на енергоносіях — 3,7 млн грн; середній термін окупності комплексу заходів — 4,2 роки; NPV за 10 років при ставці дисконтування 12 % — +18,4 млн грн.

На основі отриманих результатів розроблено покроковий алгоритм впровадження СУЕ в медичному закладі, що враховує галузеву специфіку і не потребує зупинки роботи відділень:

1. Організаційна підготовка: призначення енергоменеджера та формування енергетичної команди; визначення меж СУЕ та переліку значущих споживачів

(SEU).

2. Збір первинних даних і базова лінія: аналіз рахунків за енергоносіями за 24–36 місяців; встановлення лічильників і датчиків у ключових точках; побудова регресійної моделі за формулою (1).

3. Енергетичний аудит (рівні 1–2): термографування фасадів; аналіз балансу теплової та електричної енергії; виявлення пріоритетних заходів за критерієм T_{ок} ≤ 5 років.

4. Реалізація заходів: поетапне впровадження відповідно до пріоритетів (спочатку низьковитратні — IoT, освітлення; потім капітальні — утеплення, рекуперация).

5. M&V-верифікація: щомісячне порівняння нормалізованого і фактичного споживання; корегування планових показників за результатами моніторингу.

6. Сертифікація та безперервне вдосконалення: підготовка до сертифікації за ISO 50001; щорічний перегляд EnPI і планів заходів в рамках циклу PDCA.

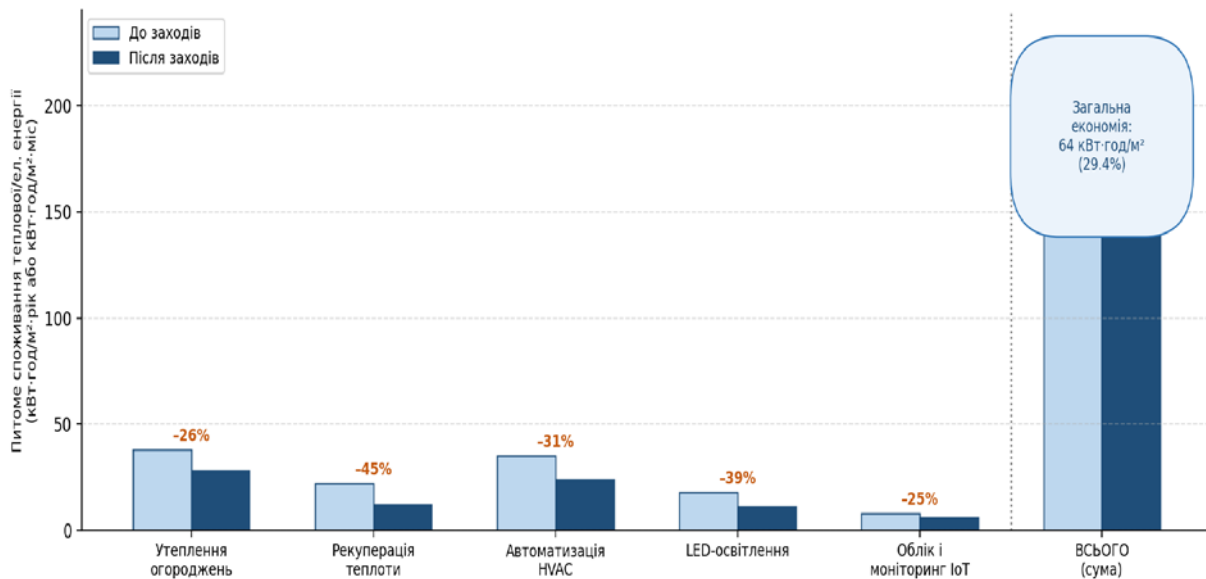


Рис. 3. Вплив енергозберігаючих заходів на питоме споживання енергії (пілотний об'єкт, 2023–2024 рр.)
Джерело: розроблено авторами на основі власних досліджень

Висновки. У статті розроблено методичні основи системи управління енергозбереженням для медичних закладів, що включають: структурно-функціональну модель CUE на базі циклу PDCA; просту регресійну модель нормалізації теплоспоживання за градусо-добами опалення ($R^2 = 0,961$); структуровану систему ключових показників ефективності EnPI; алгоритм поетапного впровадження з M&V-верифікацією.

Апробація на реальному об'єкті підтвердила практичну ефективність запропонованого підходу. Впровадження комплексу заходів (утеплення, рекуперація, автоматизація HVAC, LED-освітлення, IoT-моніторинг) загальною вартістю 8,65 млн грн забезпечило: зниження питомого теплоспоживання на 29,4 % (з 218 до 154 кВт·год/м²·рік); щорічну економію 3,7 млн грн; NPV = +18,4 млн грн за 10 років при середньому

терміні окупності 4,2 роки. Практична цінність дослідження полягає у тому, що методика не потребує спеціалізованого програмного забезпечення і може бути впроваджена енергоменеджером закладу без залучення зовнішніх консультантів.

Декларація щодо використання інструментів штучного інтелекту. Під час підготовки цієї статті було використано інструменти ШІ (зокрема, ChatGPT-4, OpenAI, 2026). Запевняємо, що використання ШІ обмежувалося редагуванням англomовного тексту анотації та структуруванням/упорядкуванням текстів та даних таблиць з обов'язковою прикінцевою перевіркою та погодженням авторами. Автори несуть повну відповідальність за науковість, зміст, дані, висновки та актуальний перелік джерел.

Список використаних джерел:

1. Anunion-Villa J., Gomez-Chaparro M., Garcia-Sanz-Calcedo J. Study of the energy intensity by built areas in a medium-sized Spanish hospital. *Energy Efficiency*. 2021. 14. No. Vol. 26. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09944-1>
2. Bawaneh K., Nezami F. G., Rasheduzzaman M., Deken B. (2019). Energy consumption analysis and characterization of healthcare facilities in the United States. *Energies*. 2018. Vol. 12. No. 19. Art. 3775. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12193775>
3. Buonomano A., Calise F., Ferruzzi G., Palombo A. (2014). Dynamic energy performance analysis : Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*, 2014. No. 78. Pp. 555–572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.042>
4. Dadi D., Introna V., Santolamazza A., Salvio M., Martini C., Pastura T., Martini F. (2022). Private hospital energy performance benchmarking using energy audit data : An Italian case study. *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 3. Art. 806. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15030806>
5. Garcia-Sanz-Calcedo J. (2014). Analysis on energy efficiency in healthcare buildings. *Journal of Healthcare Engineering*. Vol. 5. No. 3. Pp. 361–373. DOI: <https://doi.org/10.1260/2040-2295.5.3.361>
6. Gonzalez Gonzalez A., Garcia-Sanz-Calcedo J., Rodriguez Salgado D. Evaluation of energy consumption in German hospitals: Benchmarking in the public sector. *Energies*. 2018. Vol. 11. No. 9. Art. 2279. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11092279>
7. Gonzalez A. G., Garcia-Sanz-Calcedo J., Salgado D. R. (2018). A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain. *Sustainable Cities and Society*. 2018. No. 36. Pp. 169–175. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.029>
8. Hwang, D. K., Cho, J., & Moon, J. Feasibility study on energy audit and data driven analysis procedure for

building energy efficiency: Bench-marking in Korean hospital buildings. *Energies*. 2019. Vol. 12. No. 15. Art. 3006. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12153006>

9. Katrakilidis, C., Kyrgiakos, L. S., & Pailas, T. A review of energy efficiency interventions in public buildings. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 17. Art. 6329. <https://doi.org/10.3390/en16176329>

10. Psillaki M., Apostolopoulos N., Makris I., Liargovas P., Apostolopoulos S., Dimitrakopoulos P. Hospitals' energy efficiency in the perspective of saving resources and providing quality services through technological options : A systematic literature review. *Energies*. 2023. Vol. 16. No. 2. Art. 755. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020755>

References:

1. Aunion-Villa, J., Gomez-Chaparro, M., & Garcia-Sanz-Calcedo, J. (2021). Study of the energy intensity by built areas in a medium-sized Spanish hospital. *Energy Efficiency*, 14(26). <https://doi.org/10.1007/s12053-021-09944-1>

2. Bawaneh, K., Nezami, F. G., Rasheduzzaman, M., & Deken, B. (2019). Energy consumption analysis and characterization of healthcare facilities in the United States. *Energies*, 12(19), 3775. <https://doi.org/10.3390/en12193775>

3. Buonomano, A., Calise, F., Ferruzzi, G., & Palombo, A. (2014). Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. *Energy*, 78, 555–572. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.042>

4. Dadi, D., Introna, V., Santolamazza, A., Salvio, M., Martini, C., Pastura, T., & Martini, F. (2022). Private hospital energy performance benchmarking using energy audit data : An Italian case study. *Energies*, 15(3), 806. <https://doi.org/10.3390/en15030806>

5. Garcia-Sanz-Calcedo, J. (2014). Analysis on energy efficiency in healthcare buildings. *Journal of Healthcare Engineering*, 5(3), 361–373. <https://doi.org/10.1260/2040-2295.5.3.361>

6. Gonzalez Gonzalez, A., Garcia-Sanz-Calcedo, J., & Rodriguez Salgado, D. (2018). Evaluation of energy consumption in German hospitals: Benchmarking in the public sector. *Energies*, 11(9), 2279. <https://doi.org/10.3390/en11092279>

7. Gonzalez, A. G., Garcia-Sanz-Calcedo, J., & Salgado, D. R. (2018). A quantitative analysis of final energy consumption in hospitals in Spain. *Sustainable Cities and Society*, 36, 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.10.029>

8. Hwang, D. K., Cho, J., & Moon, J. (2019). Feasibility study on energy audit and data driven analysis procedure for building energy efficiency: Bench-marking in Korean hospital buildings. *Energies*, 12(15), 3006. <https://doi.org/10.3390/en12153006>

9. Katrakilidis, C., Kyrgiakos, L. S., & Pailas, T. (2023). A review of energy efficiency interventions in public buildings. *Energies*, 16(17), 6329. <https://doi.org/10.3390/en16176329>

10. Psillaki, M., Apostolopoulos, N., Makris, I., Liargovas, P., Apostolopoulos, S., & Dimitrakopoulos, P. (2023). Hospitals' energy efficiency in the perspective of saving resources and providing quality services through technological options : A systematic literature review. *Energies*, 16(2), 755. <https://doi.org/10.3390/en16020755>

Дата надходження статті: 31.03.2026 р.

Дата прийняття статті до друку: 21.04.2026 р.

Дата публікації (оприлюднення) статті: 12.05.2026 р.

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.