

JEL M20; Q12; Q30

УДК 621.311: 338.43.02: 338.434.4

**ІНТЕГРАЦІЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ  
У ФУНКЦІОНУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ АВТОМАТИЗОВАНИХ  
ВЕРТИКАЛЬНИХ СІТІ-ФЕРМ****І. Баруліна, асистент**

ORCID ID: 0009-0006-3408-0063

**Д. Барулін, асистент**

ORCID ID: 0000-0002-2904-2023

Херсонський державний аграрно-економічний університет

© І. Баруліна, Д. Барулін, 2024

<https://doi.org/10.31734/agrarecon2024.01.138>**Баруліна І., Барулін Д. Інтеграція системи енергоменеджменту у функціонування інноваційних автоматизованих вертикальних сіті-ферм**

Форми контролюваного сільського господарства у містах, такі як вертикальні ферми, мають потенціал для переміщення виробництва продуктів харчування ближче до міських центрів, допомагаючи задовольнити постійно зростаючі потреби міського населення, а також досягти глобальних кліматичних цілей. Вирощування сільськогосподарських культур у контрольованому середовищі виявилось можливим завдяки застосуванню певних механізмів та датчиків, що автоматизують їхню роботу, однак більшість із них передбачає значні енергоємні процеси. Аналіз, представлений у цій статті, спрямований на огляд поточної практики автоматизованого вертикального сіті-фермерства, а також потенційних технологій енергоефективності, які можуть підвищити сталість і прибутковість індустрії міського землеробства. Зокрема розглянуто різні датчики та виробничі механізми, завдяки яким досягаються автоматизація виробничих процесів на сіті-фермі, успішні тематичні дослідження енергетичних систем.

Система енергоменеджменту допомагає керівникам і власникам підвищити енергоефективність у сучасних будівлях та отримати вигоду як зменшення споживання енергії. Залежно від типу будівлі можна використовувати різні стратегії управління для досягнення енергозбереження. Представлено огляд стратегії управління системою енергоменеджменту на інноваційних автоматизованих вертикальних сіті-фермах для підвищення енергоефективності. Досліджено вплив споживачів на використання енергоресурсів під час фактичної експлуатації нежитлових та житлових будівель. Визначено, що лише завдяки навчанню персоналу ефективного та раціонального використання енергії можна скоротити витрати енергоресурсів до 30%. Обговорено майбутні виклики для підвищення енергоефективності в системі енергоменеджменту сіті-ферм та можливості їх подолання.

**Ключові слова:** енергоресурси, енергоефективність, енергомоніторинг, сталий розвиток, оптимізація використання енергоресурсів, міське фермерство.

**Barulina I., Barulin D. Integration of the energy management system into the functioning of innovative automated vertical city farms**

Controlled agriculture within urban areas presents a promising solution to meet the growing food demands of urban areas and achieve global climate goals. Vertical farms have emerged as a popular form of controlled agriculture that can bring food production closer to urban centers. However, these farms often rely on significant energy-intensive processes. This article provides an overview of the current practices of automated vertical city farming and potential energy-efficient technologies that can enhance the sustainability and profitability of internal agriculture. The article discusses various sensors and production mechanisms that enable the automation of production processes on city farms. It also highlights successful research on energy systems and management strategies to increase energy efficiency in modern buildings. For instance,

*implementing an energy management system can help managers and owners reduce energy consumption and benefit from increased energy efficiency. The article explores different management strategies that can be used to achieve energy-saving goals in various types of buildings. The study also emphasizes the importance of training personnel in efficient and rational energy use, as this can lead to a 30% reduction in energy resource costs. Additionally, the article examines consumers' role in energy usage during the operational phase of both residential and non-residential structures. In conclusion, the article outlines forthcoming challenges in enhancing energy efficiency within the management framework of urban farms, alongside strategies to surmount them. By leveraging advancements in automation, energy systems, and personnel training, city farms can navigate toward greater sustainability while meeting the evolving needs of urban populations.*

**Keywords:** *energy resources, energy efficiency, energy monitoring, sustainable development, optimization of energy resource usage, urban farming.*

**Постановка проблеми.** Ефективне використання енергії та стан навколишнього середовища є основними факторами сталого розвитку як на глобальному, так і на національному рівні країни. Тому поєднання енергозбереження та захисту навколишнього середовища стає невід'ємною частиною сталого розвитку суспільства на місцевому, національному та глобальному рівні. З позиції енергоресурсів можливо виділити два основні напрями: значне підвищення ефективності використання вже наявних енергоресурсів, а також упровадження відновлюваних і безпечних для навколишнього середовища джерел енергії (Лендвел, Іваницький та Гичка, 2021, с. 4).

Очікується, що споживання енергії в будівлях зросте більш ніж на 40 % протягом наступних 20 років. Електроенергія залишається найбільшим джерелом енергії, що споживається будівлями, і цей попит зростає (Mariano-Hernández et al, 2021). Щоб пом'якшити вплив зростаючого попиту, потрібні стратегії підвищення енергоефективності будівель.

Нинішня енергетична ефективність будівельного сектору незадовільна. У Європейському Союзі, де будівлі споживають майже 40 % енергії, будівельний сектор повинен відігравати ключову роль в ефективній кліматичній політиці (Marinakis, 2020). Низка європейських директив та ініціатив встановлюють чіткі цілі для держав-членів, наприклад, Директива про енергетичну ефективність будівель (EPBD) (European Commission, 2018), Директива про енергоефективність (European Commission, 2012), а також Директива про екодизайн (European

Commission, 2009) і Регламент енергетичного маркування (European Commission, 2017), що забезпечують узгоджені загальноєвропейські правила для покращання екологічних характеристик продуктів.

Такі будівлі, як житлові, освітні, офісні, медичні та промислові, стають критичними споживачами енергії. Споживання енергії для будівель становить 30–45 % світового споживання енергії (Ashouri et al, 2019), причому більшу частину енергії використовують підсистеми будівель, які складаються із систем охолодження та опалення; безпеки, водопостачання, освітлення, та аналогічно об'єднані підсистеми. У цьому контексті зусилля сьогодні зосереджені на виконанні вимог до енергоефективності будівель, гарантуючи оперативні потреби з базовою можливою вартістю енергії та екологічністю (Doukas et al., 2007). У багатьох країнах, що розвиваються, і розвинутих країнах, енергоефективність розглядається як найкращий механізм вирішення та подолання енергетичних потреб, які постійно зростають (Mariano-Hernández et al, 2021). У будь-якому разі, підвищення енергоефективності цих підсистем – дуже важке випробування, оскільки вони зазвичай мають відповідати складним робочим вимогам, динамічній потребі в енергії та потребам у комфорті.

З огляду на використання будівлі, зараз використовується ідея Системи енергоменеджменту будівель (Building Energy Management Systems). Таку систему можна описати як комбінацію стратегій і методів, необхідних для покращання її продуктивності, ефективності та використання енергії (Bonilla et al., 2018). Ця технологія дозволяє реалізовувати ключові завдання енергоменеджменту, такі як

автоматизація підходів до реагування на попит, нагляд за витратами на енергію, виявлення аномалій споживання енергії та організація інформації про споживання енергії (Seeam, Laurenson and Usmani, 2018).

Постійно зростаючий імпульс великих даних і пов'язаних із ними технологій створює безпрецедентну ринкову можливість для підвищення енергоефективності будівель та їх життєвого циклу, а також для кращого управління споживанням і виробництвом енергії на рівні будівлі (Marinakakis, 2020).

У контексті нежитлових будівель варто розглянути інтеграцію будь-яких доступних потенційних просторів усередині та ззовні будівлі шляхом адаптивного повторного використання та модернізації як частину технології міського землеробства (Saad, Hamdan and Sarker, 2021).

Сьогодні сільське господарство розвивається у міських районах, особливо вирощування продуктів харчування на дахах, відкриті сади і фермерство в закритих приміщеннях. На додаток до забезпечення більш локалізованого виробництва продуктів харчування в міських центрах, сіті-фермерство дозволяє забезпечити відповідний біозахист, зменшити вплив шкідників і посухи, цілорічного виробництва сільськогосподарських культур, при цьому скорочуючи транспортні витрати, пов'язані з традиційним землеробством (Tong et al., 2016).

Водночас вирощування сільськогосподарських культур у контрольованому середовищі стало можливим завдяки використанню інноваційних технологій, однак більшість із них передбачає енергоємні процеси. Автоматизація сіті-ферм може оптимізувати більшість процесів вирощування сільськогосподарських культур, таких як керування системами поливу, керування потоком і контролем вологості, управління температурним режимом та ін. (Дудяк та Баруліна, 2022).

У цьому контексті управління фермою та відповідний моніторинг параметрів ферми тепер незамінні для продуктивного сільського господарства в розумних містах (Podder et al., 2021).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Управління комфортом і енергією в будівлях протягом останнього десятиліття викликало значний ентузіазм досліджень. Є численні дослідження, які описують розширене використання системи енергоменеджменту або для підсистем, таких як системи охолодження та опалення, що відображаються у працях М. Ашурі та ін. (2018) та А. Сіім, Д. Лоренсона, А. Усмани (2018), або для всієї будівлі, відображені у працях Д. Боніла (2018). Автоматизацію виробничих процесів на сіті-фермах та оптимізацію використання енергоресурсів досліджували М. Саад, Н. Хамдан та М. Саркер (2021). Проте питанню впровадження системи енергоменеджменту на вертикальних сіті-фермах приділено мало уваги науковців. Оскільки за оцінками на основі статистичних даних (Saad, Hamdan and Sarker, 2021) до 2025 року розмір світового ринку вертикального сіті-фермерства зросте до 15,7 мільярда доларів (порівняно з 4,4 мільярда доларів у 2019 році), питання ефективного та раціонального використання енергетичних ресурсів на вертикальних сіті-фермах важливе та актуальне.

**Постановка завдання.** Наше завдання – визначення поточного стану і майбутніх викликів щодо впровадження системи енергоменеджменту в сіті-фермах. Для досягнення поставленої мети здійснили аналіз, спрямований на огляд поточної практики впровадження системи енергоменеджменту, впливу поведінки споживачів (для житлових будівель) та персоналу (для промислових будівель) на поточне споживання енергоресурсів, а також потенційних технологій енергоефективності на вертикальних сіті-фермах, які можуть підвищити сталість і прибутковість індустрії внутрішнього землеробства.

**Методика дослідження та матеріали.** Для виконання поставленого завдання використали загальнонаукові та спеціальні методи пізнання, що ґрунтуються на діалектичному підході, що в комплексі дало змогу систематизувати та узагальнити результати дослідження проблеми іншими вченими, що лягло в основу інформаційної бази як джерела матеріалів для нашого дослідження.

Основним методом, який дав змогу виконати окреслені завдання та досягти поставленої мети, був метод логічного аналізу та узагальнення результатів цього аналізу. На основі методу наукової абстракції сформульовано загальні висновки.

**Виклад основного матеріалу.** Енергетичний менеджмент – це постійно діюча система, яка використовується для зниження рівня споживання енергії крок за кроком, до мінімального значення, необхідного для надання послуг. Метою енергоменеджменту є покрокове зниження енергоспоживання до мінімального рівня, необхідного для виробничої діяльності підприємства з дотриманням усіх необхідних умов цієї діяльності. Основним завданням енергоменеджменту на початковому етапі є створення енергетичного балансу споживання (Тіхонова, 2022). Тоді систему енергоменеджменту слід розглядати як цикл, який складається з таких етапів:

1. Моніторинг енергетичного споживання за допомогою системи обліку; реєстрація базової лінії енергетичного споживання.
2. Аналіз фактичного споживання енергетичних ресурсів.
3. Розробка рішень, спрямованих на зниження енергоспоживання та вартості енергопостачання.
4. Впровадження запланованих заходів.
5. Безперервне покращання роботи системи (рис. 1).



Рис. 1. Система енергетичного менеджменту  
\*Сформовано автором на основі (Держенергоефективність, 2016)

Одним із яскравих та найпопулярніших відображень сіті-фермерства є вертикальні ферми, що розташовуються в середині будівель.

Сучасні інноваційні технології дозволяють автоматизувати більшість виробничих процесів, пов'язаних із вирощуванням продукції на вертикальних сіті-фермах, а саме: забезпечення необхідного світлового дня із відповідним спектром світла, регулювання температурного режиму та забезпечення необхідного повітрообміну, своєчасний полив і контроль якості поливної води з урахуванням її поживності та pH. Для функціонування всіх цих систем основним джерелом енергії і водночас головною статтею витрат є саме електроенергія. Запровадження системи енергоменеджменту на сіті-фермах дозволить знизити споживання електроенергії завдяки систематичному моніторингу та більш раціональному використанню енергоресурсів.

Як і будь-яка інша система, енергоменеджмент має безліч елементів та взаємозв'язків між ними. Елементами системи енергоменеджменту сіті-ферми є передусім навчений персонал.

На сіті-фермах, так само, як і у житлових будівлях, важливим є питання навчання споживачів раціонального поведіння з енергоресурсами.

У своєму дослідженні Нейлор С. та Джиллот М. (2018) зауважують, що дані, зібрані під час експлуатації житлових будівель, як правило, демонструють значну різницю між проектним і фактичним споживанням енергії в будівлях. Розбіжності між прогнозованими та реальними характеристиками будівлі зумовлені: недооціненням прогнозованих значень для розумного використання будівлі на етапі проектування, потенційними дефектами конструкції, що спричиняють відхилення від проектної якості будівництва, та надмірно марнотратним використанням ресурсів під час фактичної експлуатації.

Менезес та ін. (2014) наголошують, що поведінка мешканців є одним із головних факторів, які сприяють надмірному споживанню енергії під час експлуатації будівлі, поряд з ефективністю контролю послуг та відхиленнями від проектної якості будівництва.

Більшість досліджень, присвячених особливому впливу поведінки на використання енергії в будівлях, показує, що є значний

потенціал для енергозбереження завдяки глибшому розумінню використання будівлі.

Як показують дослідження, варіація кінцевого споживання енергії на 30 % залежить саме від споживачів, тобто лише завдяки навчанню персоналу ефективного та раціонального використання енергії можна скоротити витрати енергії до 30 % (Eguaras-Martínez et al., 2014)

Реєстрація енергопостачання – набір автоматичних вимірювальних приладів, що використовуються сіті-фермою для оперативного контролю витрат і споживання енергетичних ресурсів та їх параметрів. Чим вищий рівень вимірювального обладнання, тим краща якість менеджменту енергопостачання і результатів. Технічне обладнання для обліку постачання теплової енергії має виконувати такі функції:

- 1) забезпечити реєстрацію всієї вхідної і вихідної енергії та фінансових потоків;
- 2) забезпечити автоматичний контроль споживання енергії на одиницю потужності обладнання і безпечний безперервний технологічний процес;
- 3) забезпечити можливість подальшого розвитку і сумісність із системами фінансового управління для оперативного управління ціною послуги чи продукту;
- 4) забезпечити надання персоналу цілодобового доступу до інформації у вигляді таблиць, діаграм, графіків. Система має інформувати про будь-які відхилення споживання енергії від заданих параметрів і допомагати реагувати на причини збільшення споживання енергії;
- 5) автоматично здійснювати фінансовий та енергетичний баланс, розрахунок конкретних витрат та розробляти діаграми основних тенденцій.

Автоматизовані інноваційні вертикальні сіті-ферми є ключем до розвитку сталого сільського господарства та передовою агротехнологією, яка значно підвищує врожайність традиційного землеробства. Завдяки використанню різних типів датчиків можливо автоматизувати більшість виробничих процесів на фермі, наприклад, контроль системи поливу,

рівень вологості субстрату, контроль оптимальної температури та ін.

На рис. 2 показано типи датчиків та механізмів, які використовуються на автоматизованій вертикальній фермі для надання автономних послуг. Датчики безпосередньо пов'язані з параметрами навколишнього середовища, щоб фіксувати актуальні дані, такі як зміна природного освітлення, температури чи ph.



Рис. 2. Типи датчиків та виконавчих механізмів для автоматизації виробничого процесу на сіті-фермах

*\*Сформовано автором на основі (Saad, Hamdan and Sarker, 2021)*

Аналіз споживання енергії та ухвалення рішень. Залежно від розмірів сіті-ферми та номенклатури енергопостачання призначаються відповідальні енергоменеджери – спеціально навчений персонал, який може варіюватися від одного до декількох осіб. Енергоменеджери використовують методи обробки даних моніторингу споживання енергії та їх аналіз. На основі аналізу енергоменеджери ухвалюють рішення, спрямовані на підтримку оптимального рівня споживання енергетичних ресурсів, після чого – оперативно встановлені рішення. Є два основні методи контролю й аналізу споживання енергії – метод визначення необхідних норм та метод контролю і нормалізації. Найефективнішим методом аналізу споживання є метод контролю і нормалізації. Основа методу полягає в аналізі регресивної залежності подвійного значення двох витягів даних. Одним із них є вартість енергії, яку спожили, а іншим – значення чинника, від якого залежить споживання енергії. Наприк

лад, надійним фактором, який виначає витрати палива й енергії для виробництва теплової енергії для опалення, є фактична кількість градусо-днів в опалювальний період.

**Висновки.** Питання регулярного моніторингу та раціонального використання енергетичних ресурсів відіграє велике значення в ефективному функціонуванні інноваційних автоматизованих вертикальних сіті-ферм. Упровадження системи енергоменеджменту на сіті-фермах дозволить оптимізувати витрати енергетичних ресурсів та своєчасно і якісно реагувати на аварійні відхилення від базової лінії енергоспоживання.

Навчання персоналу відіграє одну із ключових ролей у системі енергоменеджменту й може дозволити зменшити споживання енергії до 30 %.

Автоматизація виробничих процесів завдяки використанню різноманітних датчиків

та приводів дозволяє отримувати актуальні дані для енергомоніторингу, а будь-яке відхилення від базової лінії оперативно вказуватиме на певне відхилення або збій у роботі систем, що забезпечують ефективне функціонування ферми.

Інвестиції в автоматизацію виробничих процесів на фермі дозволять знизити вплив людського фактору. Натомість навчання персоналу ефективної роботи з автоматизованими процесами сприятиме досягненню ефективного енергоспоживання на фермі. Зважаючи на постійне зростання вартості енергоресурсів, інтеграція системи енергомоніторингу та енергоменеджменту в роботу інноваційних автоматизованих вертикальних сіті-ферм дозволить не тільки підвищити рівень енергоефективності ферми, а й значно знизити видатки на її функціонування.

#### **СПИСОК ПОСИЛАНЬ**

Держенергоефективність, 2016. Плани Держенергоефективності стосовно впровадження системи енергетичного менеджменту [online] Доступно: [https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2016/05/3d-Forum\\_SAEI\\_presentation\\_3d-EnergyClimate-Dialogue.pdf](https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2016/05/3d-Forum_SAEI_presentation_3d-EnergyClimate-Dialogue.pdf) [Дата звернення 16 січня 2024].

Дудяк, Н. В. та Баруліна, І. Ю., 2022. Розвиток сіті-фермерства в Україні як перспективний шлях подолання продовольчої кризи. *Таврійський науковий вісник. Серія: Економіка*, 12, с. 20–28.

Лендзел, М. О., Іваницький, В. П. та Гичка, А., 2021. Енергоменеджмент та енергоаудит. Ужгород: Ужгородський національний університет.

Тихонова, Н. О., 2022. Енергоменеджмент, як складова «зеленої економіки». *Економіко-управлінські та інформаційно-аналітичні новації в будівництві: IV Міжнародна науково-практична конференція : програма та тези доповідей, Київ, 7–8 червня 2022 / Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт.*, 4 (1), с. 79–81.

Ashouri, M. et al., 2019. Development of a ranking procedure for energy performance evaluation of buildings based on occupant behavior. *Energy Build.*, 183, p. 659–671.

Bonilla, D., Samaniego, M. G., Ramos, R. and Campbell, H. 2018. Practical and low-cost monitoring tool for building energy management systems using virtual instrumentation. *Sustainable Cities and Society*, 39, p. 155–162.

Doukas, H. et al., 2007. Intelligent building energy management system using rule sets. *Build. Environ.*, 42(10), p. 3562–3569.

Eguaras-Martínez, M. et al. 2014. Simulation and evaluation of Building Information Modeling in a real pilot site. *Appl Energy*, 114 (4), p. 475–484.

European Commission. Energy Performance of Buildings Directive EU/2010/31 [online] Available at: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive> [Accessed January 16, 2024].

European Commission. Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Energy-Related Products (Recast); European Commission: Brussels, Belgium, 2009.

European Commission. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on Energy Efficiency, Amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and Repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC; European Commission: Brussels, Belgium, 2012.

European Commission. Regulation (EU) 2017/1369 of the European Parliament and of the Council of 4 July 2017 Setting a Framework for Energy Labelling and Repealing Directive 2010/30/EU; European Commission: Brussels, Belgium, 2017.

Mariano-Hernández, D., Hernández-Callejo, L., Zorita-Lamadrid, A., Duque-Pérez, O. and García, F. S., 2021. A review of strategies for building energy management system: Model predictive control, demand side management, optimization, and fault detect & diagnosis. *Journal of Building Engineering*, 33:101692.

Marinakakis, V. 2020. Big data for energy management and energy-efficient buildings. *Energies*, 13 (7), p. 15–55.

Naylor, S., Gillott, M. and Lau, T., 2018. A review of occupant-centric building control strategies to reduce building energy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 96, p. 1–10.

Podder, A. K., Al Bukhari, A., Islam, S., Mia, S., Mohammed, M. A., Kumar, N. M. and Abdulkareem, K. H., 2021. IoT based smart agrotech system for verification of Urban farming parameters. *Microprocessors and Microsystems*, 82, 104025.

Saad, M. H. M., Hamdan, N. M. and Sarker, M. R., 2021. State of the art of urban smart vertical farming automation system: Advanced topologies, issues and recommendations. *Electronics*, 10 (12), p. 14–22.

Seeam, A., Laurenson, D. and Usmani, A., 2018. Evaluating the potential of simulation assisted energy management systems: a case for electrical heating optimization. *Energy Build*, 174, p. 579–586.

Tong, Z. et al. 2016. A case study of air quality above an urban roof top vegetable farm. *Environ Pollut*, 208(Pt A), p. 256–260.

Стаття надійшла 18.01.2024

