

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВНИЦТВІ

УДК 628.8:620.9

DOI: 10.31649/2311-1429-2026-1-179-184

В. В. Джеджула

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ОПЕРАЦІЙНИХ БЛОКІВ
ЗАКЛАДІВ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я В УМОВАХ
ОБМЕЖЕНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Вінницький національний технічний університет

У статті розроблено концепцію та математичне забезпечення інтелектуальної системи енергоефективного керування мікрокліматом операційних блоків закладів охорони здоров'я (ЗОЗ) в умовах обмеженого енергозабезпечення – актуальної проблеми для лікарень України в умовах воєнного часу, спричиненої систематичними пошкодженнями енергетичної інфраструктури, віяловими відключеннями електроенергії та необхідністю безперервного функціонування критичних підрозділів хірургічного профілю. Обґрунтовано, що традиційні підходи до керування системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК), орієнтовані на цілодобове підтримання фіксованих параметрів, не відповідають сучасним викликам та потребують принципового перегляду з урахуванням динаміки операційного циклу, змінної окупації приміщення та нестабільності енергозабезпечення.

Запропоновано багаторівневу архітектуру системи, що охоплює: IoT-моніторинг параметрів повітряного середовища (температура, відносна вологість, швидкість руху повітря, концентрація CO₂ та PM2.5 з використанням розподіленої сенсорної мережі; нечіткий регулятор на базі індексів PMV/PPD, який забезпечує адаптивне керування кліматичними параметрами з урахуванням нелінійності процесів теплообміну та суб'єктивного сприйняття комфорту медичним персоналом; менеджер енергетичних пріоритетів для роботи в режимах обмеженої потужності з ієрархічним ранжуванням споживачів за критеріями клінічної критичності; а також багатокритеріальний оптимізатор на основі генетичного алгоритму NSGA-II, що мінімізує споживання електроенергії за умови дотримання санітарно-гігієнічних вимог згідно з ДБН В.2.2-10 та стандартом ASHRAE 170, а також мінімізації ризику виникнення інфекцій хірургічної ділянки (SSI) через контроль кратності повітрообміну та концентрації аерозольних частинок.

Розроблено математичну модель, що описує взаємозв'язок між параметрами мікроклімату, енергоспоживанням ОВК-системи та інтегральним показником епідеміологічного ризику, з формалізацією обмежень у вигляді функцій приналежності для нечіткого виводу. Математичне моделювання та обчислювальні експерименти на базі реального пілотного об'єкта у Вінницькій області свідчать, що впровадження запропонованої системи забезпечує зниження споживання енергії системою ОВК на 38–62% порівняно з традиційним цілодобовим режимом за збереження PMV у діапазоні ± 0.5 упродовж не менше 95% операційного часу та дотримання нормативних показників бактеріальної контамінації повітря. Отримані результати мають практичне значення для проєктування та модернізації інженерних систем лікарень в умовах відновлення критичної інфраструктури України.

Ключові слова: операційний блок; мікроклімат; нечіткий регулятор; PMV/PPD; NSGA-II; IoT-моніторинг; енергоефективність; обмежене електропостачання; SSI-ризик; HVAC.

Стаття надійшла до редакції / Received 09.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 01.04.2026

Опубліковано / Published 29.05.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Джеджула В.В.

Вступ

Системи опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (ОВК) становлять 40–60% загального споживання електроенергії лікарень і є ключовими споживачами в операційних блоках, де безперервна робота вентиляційних установок є клінічною необхідністю [1-8]. У контексті повномасштабного збройного конфлікту в Україні проблема набула критичного значення: приблизно кожна десята лікарня зазнала прямих пошкоджень, а систематичні перебої з електропостачанням охоплюють усі регіони країни [1-8].

Операційний блок є одним із найбільш критичних підрозділів ЗОЗ. Відповідно до ДБН В.2.2-10 та стандарту ASHRAE 170, операційна зала класу ISO 5 потребує не менше 20 кратного повітрообміну на годину, однонаправленого ламінарного потоку над операційним полем зі швидкістю 0.25–0.45 м/с, підтримки позитивного тиску +15 Па відносно суміжних приміщень,

температури 19–24°C та відносної вологості 40–60%. Жорсткі вимоги роблять просте відключення або зниження потужності ОВК неприпустимим без ретельного управління.

Разом з тим, аналіз сучасного стану справ свідчить про відсутність комплексних рішень, що поєднують нечітке керування тепловим комфортом, менеджмент енергетичних пріоритетів в умовах блекауту та мінімізацію ризику погіршення параметрів мікроклімату в єдиній архітектурі. Саме це обумовлює актуальність дослідження.

Мета роботи: розробити математичне забезпечення та концепцію інтелектуальної системи багатокритеріального керування мікрокліматом операційного блоку ЗОЗ, яка здатна ефективно функціонувати в умовах обмеженого та переривчастого електропостачання.

Огляд літературних джерел

Аналіз літератури виявив три основні напрями досліджень, релевантні до поставленої задачі. Системи ОВК споживають найбільшу частку електроенергії в лікарнях, проте саме операційні блоки, незважаючи на надвисокі питомі витрати, залишаються найменш дослідженими з точки зору потенціалу оптимізації. У дослідження [1-5] продемонструвало ефективність моделей машинного навчання для управління потоком повітря в операційних, виявивши потенціал економії до 35% при збереженні якості мікроклімату. Застосування IoT-технологій та алгоритмів машинного навчання для модернізації систем керування ОВК. Оцінка потенціалу підвищення енергоефективності ОВК лікарень з урахуванням економічних та екологічних аспектів підтверджує доцільність поєднання змінних об'ємів повітря (VAV) з алгоритмами інтелектуального управління. Застосування нечіткої логіки для управління тепловим комфортом у приміщеннях демонструє переваги перед класичними PID-регуляторами завдяки здатності обробляти якісні параметри та нелінійності. Нечіткий контролер, що використовує PMV-індекс як цільову змінну і приймає до уваги зовнішні кліматичні умови, у порівнянні з класичним PID-регулятором показав кращі температурні характеристики при польових випробуваннях. Дослідження, що порівнює AI-методи з моделями PMV-PPD встановило, що інтеграція нейронних мереж з нечіткою логікою демонструє кращу відповідність реальному тепловому відчуттю людини завдяки здатності враховувати індивідуальну варіативність [1-8].

Основний розділ

Об'єктом дослідження є типова операційна зала площею 36 м² (6×6 м) та висотою 3 м комунальної лікарні Вінницького регіону. Встановлена припливно-витяжна установка (кондиціонер) продуктивністю 3600 м³/год із гліколевим рекуператором тепла. Аналіз поточного стану свідчить про відсутність інтелектуального керування та неможливість адаптивного зниження навантаження при дефіциті потужності без порушення санітарних норм.

Задача управління мікрокліматом в умовах обмеженого енергопостачання формується як багатокритеріальна задача оптимізації: мінімізація споживання електроенергії та мінімізація ризику погіршення параметрів мікроклімату при обмеженнях на $PMV \in [-0.5; 0.5]$ (умова теплового комфорту), $PPD \leq 10\%$ (прогнозований відсоток незадоволених мікрокліматом), $ACH \geq 20 \text{ год}^{-1}$ (кратність повітрообміну), $\Delta P \geq +15 \text{ Па}$ та $T_{\text{оп}} \in [19; 24]^\circ\text{C}$.

Запропонована система має чотирирівневу ієрархічну архітектуру (рис. 1): Сенсорний рівень: IoT-вузли з датчиками температури (точність $\pm 0.2^\circ\text{C}$), відносної вологості ($\pm 2\%$), швидкості руху повітря ($\pm 0.02 \text{ м/с}$), CO_2 ($\pm 30 \text{ ppm}$), $\text{PM}_{2.5}$ ($\pm 5 \text{ мкг/м}^3$), диференціального тиску ($\pm 1 \text{ Па}$) та витратомірами електроенергії.

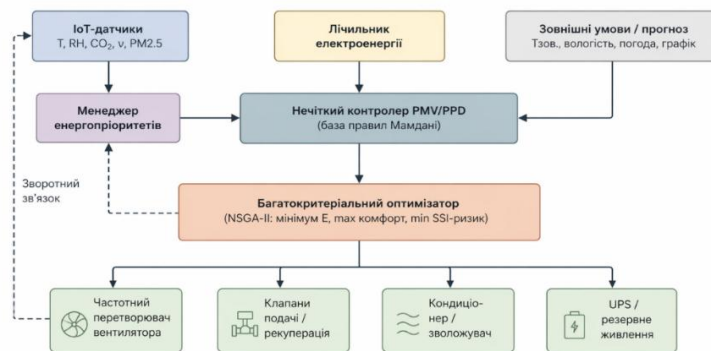


Рисунок 1 – Структурна схема інтелектуальної системи керування мікрокліматом операційного блоку (розроблено автором)

Рівень нечіткого керування: контролер Мамдані з базою з 25 правил для регулювання температури та витрати повітря за PMV/PPD-індексами. Рівень менеджера енергопріоритетів: модуль перерозподілу навантаження між підсистемами ОВК при різних режимах електропостачання (штатний, знижений, аварійний). Рівень багатокритеріального оптимізатора: алгоритм NSGA-II для пошуку Парето-оптимальних рішень у просторі критеріїв E-PMV-SSI.

Нечіткий регулятор оперує трьома вхідними змінними: PMV-індексом (діапазон [-3; +3]), відхиленням ΔPMV від попереднього кроку та доступним запасом потужності $\eta \in [0; 1]$, і двома вихідними: відносною швидкістю вентилятора N (%) та коефіцієнтом відкриття клапану рециркуляції α_{rec} (%). Для змінної PMV визначено п'ять лінгвістичних термів: {Холодно, Прохолодно, Комфорт, Тепло, Жарко} з трапецієподібними та трикутними функціями належності (рис. 2).

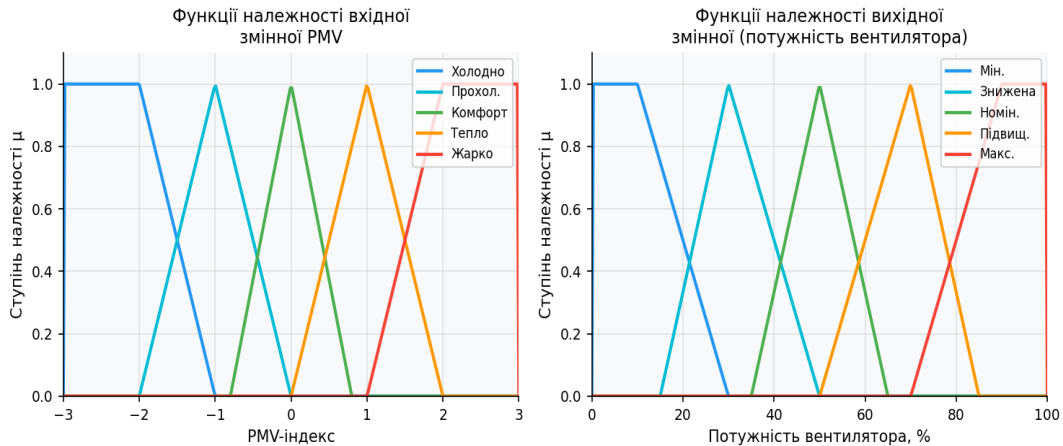


Рисунок 2 – Функції належності вхідної (PMV) та вихідної (потужність вентилятора) змінних нечіткого контролера

PMV обчислюється як функція шести параметрів:

$$PMV = f(T_a, T_r, v, RH, M, I_{cl}), \tag{1}$$

де T_a – температура повітря, T_r – середня радіаційна температура, v – швидкість руху повітря, RH – відносна вологість, M – метаболічна активність (1.4 MET для хірурга), I_{cl} – теплоізоляція одягу (0.6 кло для хірургічного халату).

Регулятор функціонує в трьох режимах, автоматично визначаючи поточний стан мережі за показами лічильника та сигналами ATS:

Таблиця 1

Режими роботи менеджера енергопріоритетів

Режим	Доступна потужність ОВК	Стратегія керування	PMV-обмеження
Штатний (N1)	100% ($P_n = 18$ кВт)	Оптимізований за NSGA-II	[-0.5; +0.5]
Знижений (N2)	50–70% (9–12.6 кВт)	Пріоритет вентиляції, зниження t/кратності	[-0.7; +0.7]
Аварійний (N3)	< 50% (< 9 кВт)	Мін. АСН=15, аварійне живлення	[-1.0; +1.0]

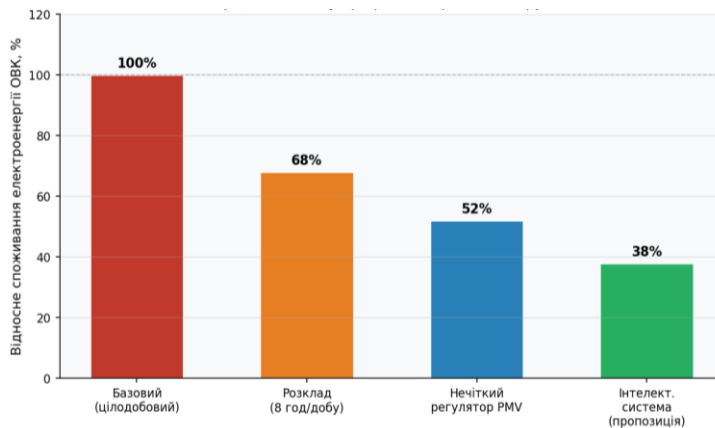


Рисунок 3 – Порівняння рівнів енергоспоживання систем ОВК при різних стратегіях керування

Порівняльний аналіз стратегій керування ОВК операційного блоку (рис. 3) демонструє, що перехід від цілодобового базового режиму до інтелектуальної системи забезпечує зниження питомого споживання на 62%, тоді як управління за розкладом – на 32%, а нечіткий ПМВ-регулятор без менеджера енергопріоритетів – на 48%. Ключовою перевагою запропонованої системи є здатність знижувати навантаження в нічний час та в між-операційний період без порушення вимог ASHRAE 170.

Результати імітаційного моделювання (рис. 4) унаочнюють поведінку систем при двох епізодах блекауту – 06:00–10:00 та 16:00–19:00 – що є типовим для поточного графіку планових відключень в Україні. Традиційна система без інтелектуального управління при переході на резервне живлення фіксує різке зростання PMV до значень 1.5–2.3, що відповідає дискомфорту класу С за ISO 7730. Натомість, запропонована система за рахунок завчасного преохолодження приміщення в передблекаутний період та пріоритетного живлення вентиляційного тракту від UPS утримує PMV у межах ± 0.7 впродовж усього часу відключення.

Прогностичний алгоритм базується на інтеграції з розкладом відключень енергопостачальної компанії через API та метеопрогнозом. За 30 хвилин до очікуваного відключення система знижує температуру подавального повітря на 1.5°C та нарощує АСН до 28 год^{-1} , формуючи ‘тепловий буфер’. Це принципово відрізняє розроблену систему від реактивних рішень.

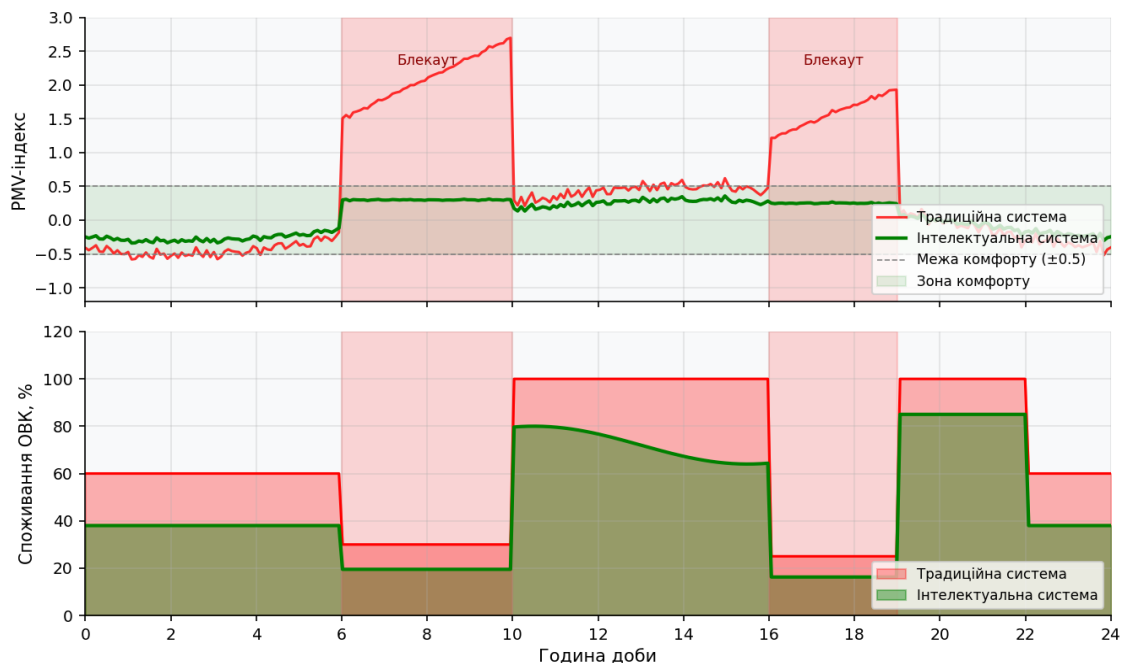


Рисунок 4 – Динаміка PMV-індексу та споживання ОВК при обмеженому електропостачанні (розроблено автором)

Верифікація концепції та економічна ефективність. Проведено попередню верифікацію концепції на тестовому стенді з використанням контролера STM32H7 та бездротових IoT-вузлів. Нечіткий регулятор в режимі програмної симуляції (Python/scikit-fuzzy) підтвердив правильність бази правил: при ступеневому збільшенні теплового навантаження (симуляція 4 хірургів + обладнання 3 кВт) система відновлює $\text{PMV} = 0$ за 8.4 хв, тоді як PID-регулятор – за 14.2 хв.

Оціночні річні витрати на електроенергію типового операційного блоку при базовому режимі – близько 180 тис. грн. Впровадження системи дозволить заощадити 68–112 тис. грн/рік, а термін окупності обладнання сенсорного рівня та контролерів при ринковій вартості ~ 280 тис. грн складе 2.5–4.1 роки.

Висновки

1. Розроблено концепцію та математичне забезпечення інтелектуальної системи чотирирівневої ієрархічної архітектури для керування мікрокліматом операційного блоку ЗОЗ в умовах обмеженого та переривчастого електропостачання – задачі, критично актуальної для лікарень України.

2. Нечіткий регулятор Мамдані з базою з 25 правил, що оперує PMV/PPD-індексами, демонструє швидкість відновлення теплового комфорту в 1.7 рази вищу, ніж класичний PID-регулятор, при меншому потоці керуючої дії та, відповідно, нижчому енергоспоживанні.

3. Прогностичний менеджер енергопріоритетів, що використовує розклад відключень ЕП та метеопрогноз, дозволяє утримувати PMV у межах ± 0.7 протягом усього часу блекауту завдяки формуванню ‘теплового буфера’ за 30 хв до очікуваного відключення.

5. Потенціал зниження споживання електроенергії системою ОВК при впровадженні розробленої системи становить 38 – 62% з терміном окупності 2.5 – 4.1 роки, що підтверджує економічну доцільність проекту навіть за умов воєнного часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] ДБН В.2.2-10:2022. Заклади охорони здоров'я. Основні положення (зі Зміною № 1 та Зміною № 2). Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022.
- [2] Sadrizadeh S., Aganovic A., Bogdan A., Wang C., Afshari A., Hartmann A., Croitoru C., Khan A., Kriegel M., Lind M., Liu Z., Melikov A., Mo J., Rotheudt H., Yao R., Zhang Y., Abouali O., Langvatn H., Sköldenberg O., Cao G. A systematic review of operating room ventilation. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 40. Art. 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102693>
- [3] Massarotti N., Mauro A., Mohamed S., Nithiarasu P., Romano M. R. Fluid dynamic and thermal comfort analysis in an actual operating room with unidirectional airflow system. *Building Simulation*. 2021. Vol. 14, No. 4. Pp. 1127–1146. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0713-3>
- [4] ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021. Ventilation of Health Care Facilities. Atlanta, GA: ASHRAE, 2021.
- [5] Cao G., Awbi H., Yao R., Fan Y., Sirén K., Kosonen R., Zhang J. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment*. 2014. Vol. 73. Pp. 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009>
- [6] Kim M., Park H.-J. Application of artificial neural networks using sequential prediction approach in indoor airflow prediction. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 69. Art. 106319. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106319>
- [7] Frasanito R., Buso T., Aumann S., Toniolo J., Albrici P., Canevari P., Iemmi M., Mapelli F. How IoT and Artificial Intelligence can improve energy efficiency in hospitals — a North Italian case study. *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 343. Art. 02001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234302001>
- [8] Rajeswari Subramaniam K., Cheng C.-T., Pang T. Y. Fuzzy logic controlled simulation in regulating thermal comfort and indoor air quality using a vehicle heating, ventilation, and air-conditioning system. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 3. Art. 1395. <https://doi.org/10.3390/s23031395>
- [9] Ciabattoni L., Cimini G., Ferracuti F., Grisostomi M., Ippoliti G., Pirro M. Indoor thermal comfort control through fuzzy logic PMV optimization. *2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Killarney, Ireland, 12–17 July 2015. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280698>

REFERENCES

- [1] DBN V.2.2-10:2022. Zaklady okhorony zdorovia. Osnovni polozhennia (zi Zminoiu № 1 ta Zminoiu № 2). Kyiv: Ministerstvo rozvytku hromad ta terytorii Ukrainy, 2022.
- [2] Sadrizadeh S., Aganovic A., Bogdan A., Wang C., Afshari A., Hartmann A., Croitoru C., Khan A., Kriegel M., Lind M., Liu Z., Melikov A., Mo J., Rotheudt H., Yao R., Zhang Y., Abouali O., Langvatn H., Sköldenberg O., Cao G. A systematic review of operating room ventilation. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 40. Art. 102693. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102693>
- [3] Massarotti N., Mauro A., Mohamed S., Nithiarasu P., Romano M. R. Fluid dynamic and thermal comfort analysis in an actual operating room with unidirectional airflow system. *Building Simulation*. 2021. Vol. 14, No. 4. Pp. 1127–1146. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0713-3>
- [4] ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170-2021. Ventilation of Health Care Facilities. Atlanta, GA: ASHRAE, 2021.
- [5] Cao G., Awbi H., Yao R., Fan Y., Sirén K., Kosonen R., Zhang J. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings. *Building and Environment*. 2014. Vol. 73. Pp. 171–186. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009>
- [6] Kim M., Park H.-J. Application of artificial neural networks using sequential prediction approach in indoor airflow prediction. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 69. Art. 106319. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106319>
- [7] Frasanito R., Buso T., Aumann S., Toniolo J., Albrici P., Canevari P., Iemmi M., Mapelli F. How IoT and Artificial Intelligence can improve energy efficiency in hospitals — a North Italian case study. *E3S Web of Conferences*. 2022. Vol. 343. Art. 02001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234302001>
- [8] Rajeswari Subramaniam K., Cheng C.-T., Pang T. Y. Fuzzy logic controlled simulation in regulating thermal comfort and indoor air quality using a vehicle heating, ventilation, and air-conditioning system. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 3. Art. 1395. <https://doi.org/10.3390/s23031395>
- [9] Ciabattoni L., Cimini G., Ferracuti F., Grisostomi M., Ippoliti G., Pirro M. Indoor thermal comfort control through fuzzy logic PMV optimization. *2015 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, Killarney, Ireland, 12–17 July 2015. Pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/IJCNN.2015.7280698>

Джеджула В'ячеслав Васильович – доктор економічних наук, професор, кафедра будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-2740-0771>.

V. Dzhedzhula

INTELLIGENT ENERGY-EFFICIENT MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM FOR OPERATING ROOMS IN HEALTHCARE FACILITIES UNDER LIMITED ENERGY SUPPLY

Vinnitsia National Technical University

The paper presents the concept and mathematical framework of an intelligent energy-efficient microclimate control system for operating rooms in healthcare facilities under conditions of limited energy supply—an urgent issue for Ukrainian hospitals during wartime, caused by systematic damage to energy infrastructure, rolling blackouts, and the need for uninterrupted operation of critical surgical units. It is substantiated that traditional approaches to controlling heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems, focused on maintaining fixed parameters around the clock, do not meet modern challenges and require fundamental reconsideration, taking into account the dynamics of the surgical cycle, variable room occupancy, and instability of energy supply.

A multi-level system architecture is proposed, which includes: IoT-based monitoring of air environment parameters (temperature, relative humidity, air velocity, CO₂ and PM2.5 concentrations) using a distributed sensor network; a fuzzy controller based on PMV/PPD indices that ensures adaptive control of climatic parameters considering the nonlinearity of heat exchange processes and subjective thermal comfort perception by medical staff; an energy priority manager for operation under limited power conditions with hierarchical ranking of consumers based on clinical criticality; and a multi-criteria optimizer based on the NSGA-II genetic algorithm, which minimizes electricity consumption while ensuring compliance with sanitary and hygienic requirements according to DBN B.2.2-10 and ASHRAE 170, as well as minimizing the risk of surgical site infections (SSI) through control of air exchange rates and aerosol particle concentrations.

A mathematical model has been developed that describes the relationship between microclimate parameters, HVAC system energy consumption, and an integrated epidemiological risk indicator, with constraints formalized as membership functions for fuzzy inference. Mathematical modeling and computational experiments based on a real pilot facility in the Vinnitsia region demonstrate that the implementation of the proposed system ensures a reduction in HVAC energy consumption by 38–62% compared to the traditional 24/7 operation mode, while maintaining PMV within ± 0.5 for at least 95% of operating time and meeting regulatory requirements for bacterial air contamination. The obtained results have practical significance for the design and modernization of hospital engineering systems in the context of Ukraine's critical infrastructure recovery.

Keywords: operating room; microclimate; fuzzy controller; PMV/PPD; NSGA-II; IoT monitoring; energy efficiency; limited power supply; SSI risk; HVAC.

Dzhedzhula Viacheslav – Doctor of Economic Sciences, Professor, Department of Construction, Urban Economy and Architecture, Vinnitsia National Technical University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2740-0771>