

ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

УДК 628.852.2

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.123-129](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.123-129)

І.В. Савеленко, доц., канд. техн. наук, **К.Г. Петрова**, доц., канд. техн. наук,
А.І. Котиш, доц., канд. техн. наук, **О.І. Сіріков**, доц., канд. техн. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: ivan.savelenko@gmail.com

Оптимізація параметрів мікроклімату в навчальних закладах з системами локальної рекуперації повітря

Розроблена система автоматичного керування локальною рекуперацією повітря, яка гарантує оптимальні параметри мікроклімату у приміщеннях навчальних закладів. Застосовано комп'ютерне імітаційне моделювання системи керування мікрокліматом на основі температури та концентрації CO₂. Виявлено переваги запропонованої системи, яка зменшила тривалість періоду з перевищенням максимально допустимого рівня концентрації CO₂ на 49,5%, а також знизила значення концентрації CO₂ на 13,1%, при відповідних межах температури.

система локальної рекуперації повітря, мікроклімат приміщення, система автоматичного керування, якість повітря

Постановка проблеми. Забезпечення комфортного теплового та повітряного режиму у навчальних приміщеннях має велике значення для здоров'я та працездатності як учнів, так і вчителів. Невідповідність нормативним значенням температури повітря в приміщеннях, особливо в поєднанні з підвищеною вологістю, призводить до збільшення втрати тепла організмом, що може призвести до захворювань. Крім того, фізико-хімічний склад повітря у навчальних приміщеннях постійно змінюється протягом дня через виділення продуктів дихання людей, що призводить до змін у рівні іонів та наявності важких частинок у повітрі. Це може спричинити погіршення працездатності (втоми, головних болів, зниження концентрації) та стану здоров'я (збільшення пульсу, зміни артеріального тиску, подразнення слизових оболонок, кашель і т.д.) як учнів, так і вчителів [1].

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. Основні принципи термомодернізації будівель, згідно вимог Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» полягають у підвищенні термічного опору огорожуючих конструкцій будівель, що значно підвищує їх щільність та відповідно мінімізує природню інфільтрацію повітря. Наскрізне провітрювання приміщень впродовж 5-10 хвилинної перерви зменшує вміст діоксиду вуглецю (CO₂) на 33-50 %, однак така концентрація не відповідає рекомендованим значенням в 1000 ppm [2].

Експериментальні дослідження параметрів теплового комфорту підтвердили [4], що у більшості навчальних закладів системи вентиляції перебувають у неробочому стані або відсутні взагалі, а нормативні показники мікроклімату приміщень не відповідають нормативним [2]. Відновлення централізованих вентиляційних систем ускладнене частковим демонтажем систем припливно-витяжних установок [5, 6]. Для забезпечення мінімально допустимого рівня теплового комфорту часто використовують локальні вентиляційні установки. Проте, існуючі локальні рекупераційні вентиляційні установки, хоча й дозволяють покращити параметри мікроклімату приміщень, однак мають перелік недоліків, зокрема зростання шумового фону, наявність холодних

протягів у місцях їх встановлення тощо, що унеможлиблює їх використання в дитячих навчальних закладах.

Питання забезпечення оптимального мікроклімату приміщень навчальних закладів розглянуто в роботах [5-9], але у більшості випадків увага присвячена енергоощадним режимам роботи систем вентиляції [5, 6], або розробленню систем вентиляції з природним спонуканням [7], які не завжди можуть забезпечити розрахунковий повітрообмін в зимовий період року. Потенціал природної вентиляції для забезпечення якісного складу повітря в приміщеннях навчальних закладах США за періодичної роботи механічних систем вентиляції розглянуто в [8]. Проблеми забезпечення необхідних умов теплового комфорту та прийнятної якості повітря для навчально-спортивних закладів шляхом імітаційного моделювання в середовищі COMIS досліджено в [9], доведена необхідність застосування примусової вентиляції. В роботах [5-10] й констатується сам факт такої проблеми, єдиного ефективного рішення не запропоновано. А отже, подальший пошук можливостей створення комфортного та безпечного повітряного середовища навчальних приміщень є пріоритетним завданням системи охорони здоров'я та екології.

Постановка завдання. Метою є розроблення автоматичної системи локальної рекуперації повітря для забезпечення теплового комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень навчальних закладів.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– створити комп'ютерну імітаційну модель керування мікрокліматом за допомогою САК, що містять канали керування за температурою та концентрацією діоксиду вуглецю;

– визначити ефект від застосування розробленого алгоритму автоматичного керування установками локальної рекуперації шляхом комп'ютерного імітаційного моделювання.

Виклад основного матеріалу. До параметрів мікроклімату належать: температура повітря, відносна вологість приміщень, швидкість руху повітря, інтенсивність теплового випромінювання і температура поверхні. Межами допустимих зон в приміщеннях навчальних закладів є повітря з відносною вологістю $\varphi \in (30...70)\%$ за температури $t \in (16...24)^\circ\text{C}$ та вмістом $\text{CO}_2 \in (1000...1500)$ ppm.

Одним із шляхів підвищення ефективності роботи системи локальної рекуперації повітря, а саме підтримання нормативних вимог до теплового комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень дитячих навчальних закладів є створення оптимальних параметрів мікроклімату за рахунок удосконалення систем автоматичного керування пристроями локальної рекуперації.

На рис.1 зображена узагальнена структурна схема системи автоматичного керування мікрокліматом в приміщенні навчального закладу з установками локальної рекуперації повітря.

На рис. 1: $t_{\text{зовн}}$, $C_{\text{зовн}}$ – значення температури та концентрації діоксиду вуглецю повітря, що подаються, як збурення на об'єкт; $t'_{\text{зовн}}$, $C'_{\text{зовн}}$, $t'_{\text{вн}}$, $C'_{\text{вн}}$ – виміряні значення температури та концентрації діоксиду вуглецю зовнішнього та внутрішнього повітря; $K_{\text{опт}}$ – вектор оптимальних значень, що визначений системою автоматичного керування, $W_{\text{опт}}$ – вектор керуючих впливів на продуктивність системи локальної рекуперації (об'єкт керування).

Модель об'єкту керування мікрокліматом в приміщенні складається з двох незалежних каналів – температури та концентрації діоксиду вуглецю. Для каналу контролю температури залежність внутрішньої температури в приміщенні $t_{\text{вн}}$ від температури зовнішнього повітря та масообмін повітря у приміщенні знаходиться з балансу теплової потужності:

$$Q_{\text{прим}} = Q_{\text{дж}} - Q_{\text{вих}} + Q_{\text{вх}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{прим}}$ – теплова енергія приміщення, Вт;

$Q_{\text{дж}}$ – теплова енергія, що надходить від внутрішніх джерел (опалювальні прилади, люди), Вт;

$Q_{\text{вих}}$ – теплова енергія, що витрачається з вихідним повітрям;

$Q_{\text{вх}}$ – теплова енергія, що надходить до приміщення з вхідним повітрям.

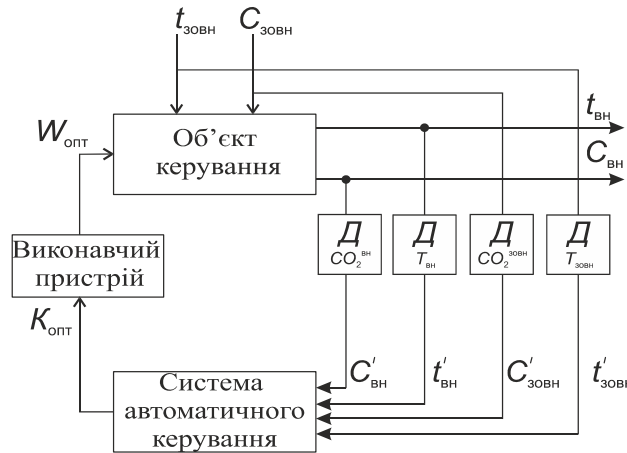


Рисунок 1 – Структурна схема САК мікрокліматом в приміщенні навчального закладу
Джерело: розроблено авторами

Баланс теплової потужності у диференціальній формі:

$$m_{\text{пов}} c_{\text{пов}} \frac{dt}{d\tau} = Q_{\text{дж}} - m_{\text{вих}} c_{\text{пов}} t_{\text{вн}} + m_{\text{вх}} c_{\text{пов}} t_{\text{зовн}}, \quad (2)$$

де τ – час, с; $m_{\text{пов}}$ – маса повітря в приміщенні, кг;

$c_{\text{пов}}$ – питома теплоємність повітря, Вт/кг·°С;

$m_{\text{вих}}$ – маса витяжного повітря, кг;

$m_{\text{вх}}$ – маса припливного повітря, кг;

$t_{\text{вн}}$ – температура повітря всередині приміщення, °С;

$t_{\text{зовн}}$ – температура припливного повітря до приміщення, °С.

Проведемо алгебраїчні перетворення виразу (1), приймаючи, що $m_{\text{вих}} = m_{\text{вх}} = m_{\text{вент}}$:

$$m_{\text{пов}} c_{\text{пов}} \frac{dt}{d\tau} = Q_{\text{дж}} - m_{\text{вент}} c_{\text{пов}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}}), \quad (3)$$

звідки:

$$\begin{aligned} \frac{dt}{d\tau} &= \frac{Q_{\text{дж}} - m_{\text{вент}} c_{\text{пов}} (t_{\text{вн}} - t_{\text{зовн}})}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} = \frac{dt}{d\tau} = \frac{Q_{\text{дж}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} - \frac{m_{\text{вент}} c_{\text{пов}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} t_{\text{вн}} + \frac{m_{\text{вент}} c_{\text{пов}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} t_{\text{зовн}} = \\ &= \frac{dt}{d\tau} = \frac{Q_{\text{дж}}}{m_{\text{пов}} c_{\text{пов}}} - \frac{m_{\text{вент}}}{m_{\text{пов}}} t_{\text{вн}} + \frac{m_{\text{вент}}}{m_{\text{пов}}} t_{\text{зовн}}. \end{aligned}$$

Зробивши деякі алгебраїчні перетворення отримаємо кінцевий частковий розв'язок рівняння (2):

$$t(\tau) = t_{\text{вн}} \cdot e^{-\frac{m_{\text{вент}}}{m_{\text{пов}}} \tau} + \left(1 - e^{-K_v \tau}\right) \left(\frac{Q_{\text{дж}}}{c_{\text{пов}} m_{\text{вент}}} + t_{\text{зовн}} \right), \quad (4)$$

де K_v – кратність повітрообміну в приміщенні.

Розв’язок рівняння балансу концентрації діоксиду вуглецю для навчального приміщення:

$$C_{CO_2}(\tau) = C_{зОВН} \cdot e^{-\frac{V_{вент}}{V_{пов}}} + \left(1 - e^{-\frac{V_{вент}}{V_{пов}}}\right) \left(C_{зОВН} + \frac{n \cdot C_p}{V_{вих}}\right), \tag{5}$$

де n – кількість осіб, що знаходяться у приміщенні;
 C_p – кількість діоксиду вуглецю, що надходить до повітря приміщення від учнів, мг.

Забезпечення зниження рівня теплового комфорту та підтримання мінімальної концентрації діоксиду вуглецю виконують шляхом автоматичного керування повітряним потоком установками локальної рекуперації. Для врахування такого впливу задачу керування установками локальної рекуперації, що враховують рівень комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень краще представити, як задачу багатокритеріальної оптимізації [14]. Постановка такої задачі має наступний вигляд:

$$\begin{cases} Q_1(K_v) = -T_{вн}(K_v) \rightarrow \min; \\ Q_2(K_v) = C_{вн}(K_v) \rightarrow \min; \\ K_v \in [K_{v.min} \dots K_{v.max}], \end{cases} \tag{6}$$

де Q_1, Q_2 – критерії оптимізації;
 K_v – кратність повітрообміну в приміщенні за рахунок роботи локальних рекуператорів;
 $[K_{v.min} \dots K_{v.max}]$ – область допустимих значень кратності повітря K_v ;
 $T_{вн}(K_v)$ – значення усталеного відхилення внутрішньої температури приміщення за рахунок припливного повітря від пристроїв локальної рекуперації.

Розв’язок задачі багатокритеріальної оптимізації вигляду (6) отримаємо із застосуванням методу наближення до утопічної точки в просторі критеріїв [12].

Узагальнена структурна схема даної комп’ютерної імітаційної моделі САК наведена на рис. 2.

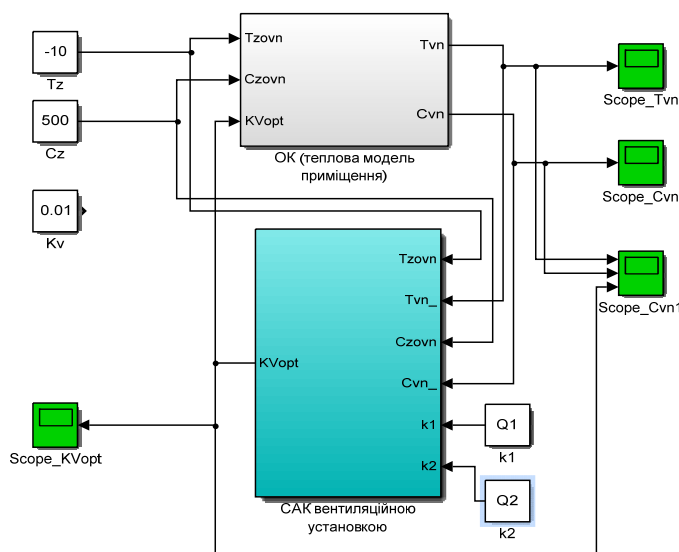


Рисунок 2 – Узагальнена комп’ютерна модель САК установкою локальної припливно-витяжної вентиляції

Джерело: розроблено авторами

Результати комп'ютерного імітаційного моделювання наведені на рис. 3 – 5 у вигляді графіків.

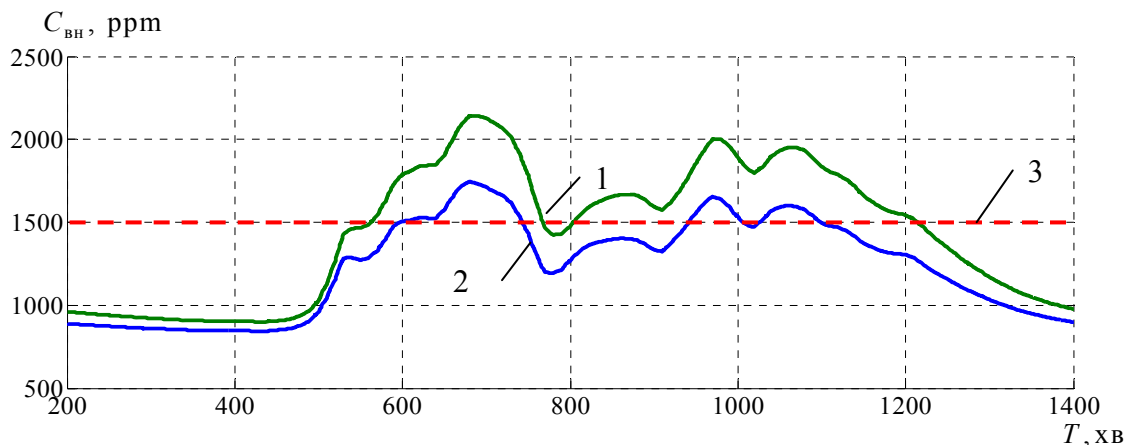


Рисунок 3 – Графік концентрації CO_2 для базової (1), розробленої моделі (2) САК параметрами мікроклімату та максимально допустимий рівень концентрації CO_2 всередині приміщення (3)

Джерело: розроблено авторами

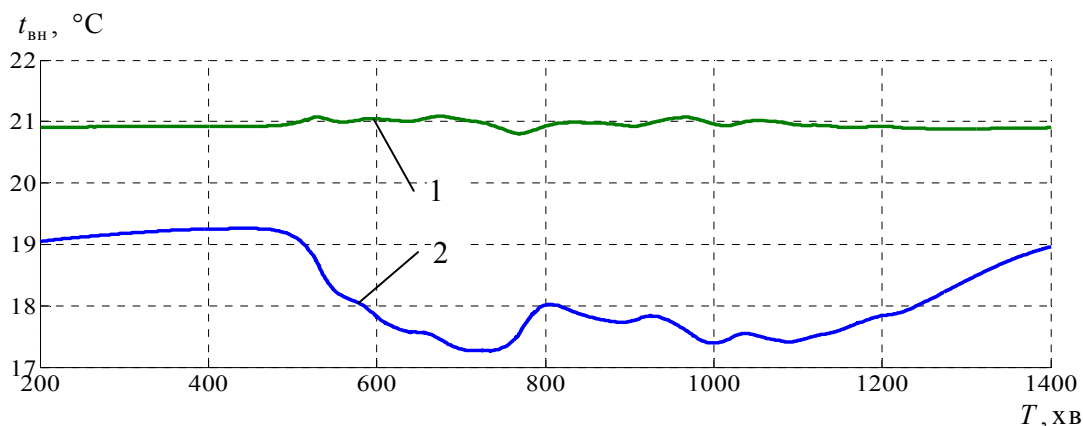


Рисунок 4 – Графік температури всередині приміщення для базової (1) та розробленої моделі (2) САК параметрами мікроклімату

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рис. 3, тривалість зони з перевищенням максимально допустимого рівня концентрації CO_2 всередині приміщення у випадку запропонованої в роботі моделі виявилась на 567 хв меншою, ніж для базової моделі. Крім того, як видно з рис. 4 розроблена система, також обмежує відхилення температури в приміщенні, що дозволяє підтримувати допустимі значення теплового комфорту згідно вимог [4].

Висновки:

1. У результаті проведених досліджень встановлено, що задачу керування установками локальної рекуперації, що враховують рівень комфорту та нормативного складу повітряного середовища приміщень, краще представити, як задачу багатокритеріальної оптимізації, а її розв'язок отримати із застосуванням методу наближення до утопічної точки в просторі критеріїв.

2. Проведений аналіз ефекту від застосування запропонованого підходу підтвердив переваги запропонованої системи шляхом зменшення тривалості зони з перевищенням максимально допустимого рівня концентрації CO_2 на 49,5 % та зменшення значення концентрації CO_2 на 13,1% за умови підтримання температури в гранично допустимих межах.

Список літератури

1. Сукач С.В., Козловська Т.Ф. Оцінювання впливу мікроклімату навчальних приміщень на розумову працездатність студентів . *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. Вип. 31. С. 105-112.
2. Waheed A., Tariq M. The Impact of Renewable Energy on Carbon Dioxide Emissions: An Empirical Analysis of Selected South Asian Countries . *Ukrainian Journal of Ecology*. 2019. 9(4). Pp. 527-534. DOI: 10.15421/2019_785.
3. Івасенко В.М., Ганчев Б.С. Вимірювання діоксиду вуглецю в приміщенні громадських, житлових та офісних будівель . *ScienceRise : Scientific Journal*. 2018. №7(48). С. 38-41.
4. ДБН В.2.2-3:2018. Будинки і споруди. Заклади освіти. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2018. 57 с. (Державні будівельні норми України).
5. A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings / Cao G., Awbi H., Yao R., Fan Y., Sirén K., Kosonen R., Zhang J. (Jensen) . *Building and Environment*. 2014. Vol. 73. P. 171–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009>
6. Chenari B., Dias Carrilho J., Gameiro da Silva M. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1426–1447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074>
7. Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter / Lei Z., Liu C., Wang L., Li N. *Building and Environment*. 2017. Vol. 125. P. 240–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051>
8. Cheng Z., Li L., Bahnfleth W. P. Natural ventilation potential for gymnasias – Case study of ventilation and comfort in a multisport facility in northeastern United States . *Building and Environment*. 2016. Vol. 108. P. 85–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.019>
9. Experimental and theoretical investigation of air exchange rate of an indoor aquatic center / Panaras G., Markogiannaki M., Tolis E. I., Sakellaris Y., Bartzis J. G. . *Sustainable Cities and Society*. 2018. Vol. 39. P. 126–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.012>
10. M. He, J. Zheng, Z. Liu. Study on indoor thermal environment under winter air-conditioning condition in one university students' dormitory in Chongqing . *Refrigeration and Air-conditioning*. 2014. № 14 P. 89–93.
11. Авраменко М.М., Сукач С.В., Кобилянський М.А. Підтримка параметрів мікроклімату в нормативних межах як засіб створення комфортних умов праці . *Електромеханічні і енергозберігаючі системи: щоквартальний науково-виробничий журнал*. 2010. Вип. 4/2010 (12). С. 94–99.
12. Зінзура В. В. Методи розв'язку задачі багатокритеріальної оптимізації регулювання напруги в електричних мережах . *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація : зб. наук. праць Кіровоградського нац. техн. у-ту* . 2012. Вип. 25, Ч. 1. С. 350-360.

References

1. Sukach, S.V. & Kozlovska, T.F. (2016). Otsiniuvannia vplyvu mikroklimatu navchalnykh prymishchen na rozumovu pratsezdattnist studentiv [Evaluation of the influence of the microclimate of educational premises on the mental capacity of students]. *Problemy okhorony pratsi v Ukraini – Problems of labor protection in Ukraine, Issue 31*, 105-112 [in Ukrainian].
2. Waheed, A. & Tariq, M. (2019). The Impact of Renewable Energy on Carbon Dioxide Emissions: An Empirical Analysis of Selected South Asian Countries . *Ukrainian Journal of Ecology*, 9(4), pp. 527-534. DOI: 10.15421/2019_785 [in English].
3. Ivasenko, V.M. & Hanchev, B.S. (2018). Vymiriuvannia dioksydu vuhletsiu v prymishchenni hromadskykh, zhytlovykh ta ofisnykh budivel [Measurement of carbon dioxide in the premises of public, residential and office buildings]. *Scientific Journal «ScienceRise»* – , 7(48), 38-41 [in Ukrainian].
4. Budinki i sporudi. Zakladi osviti. (2018). *DBN V.2.2-3:2018*. Київ: Ministerstvo regional'nogo rozvitku, budivnictva ta zhitlovo-komunal'nogo gospodarstva Ukraïni (Derzhavni budivel'ni normi Ukraïni) [in Ukrainian].
5. Cao, G., Awbi, H., Yao, R., Fan, Y., Sirén, K., Kosonen, R. & Zhang, J. (Jensen). (2014). A review of the performance of different ventilation and airflow distribution systems in buildings . *Building and Environment*, Vol. 73, P. 171–186. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.12.009> [in English].
6. Chenari, B., Dias Carrilho, J. & Gameiro da Silva, M. (2016). Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings: A review . *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 59, P. 1426–1447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.074> [in English].

7. Lei Z., Liu C., Wang L. & Li N. (2017). Effect of natural ventilation on indoor air quality and thermal comfort in dormitory during winter . *Building and Environment, Vol. 125*, P. 240–247. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.051> [in English].
8. Cheng, Z., Li, L. & Bahnfleth, W.P. (2016). Natural ventilation potential for gymnasia – Case study of ventilation and comfort in a multisport facility in northeastern United States . *Building and Environment, Vol. 108*, P. 85–98. doi: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.08.019> [in English].
9. Panaras, G., Markogiannaki, M., Tolis, E.I., Sakellaris, Y. & Bartzis, J.G. (2018). Experimental and theoretical investigation of air exchange rate of an indoor aquatic center . *Sustainable Cities and Society, Vol. 39*, P. 126–134. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.012> [in English].
10. He, M., Zheng, J. & Liu, Z. (2014). Study on indoor thermal environment under winter air-conditioning condition in one university students' dormitory in Chongqing . *Refrigeration and Air-conditioning, 14*, P. 89–93 [in English].
11. Avramenko, M.M., Sukach, S.V. & Kobylanskyi, M.A. (2010). Pidtrymka parametriv mikroklimatu v normatyvnykh mezhakh yak zasib stvorennia komfortnykh umov pratsi [Maintaining microclimate parameters within regulatory limits as a means of creating comfortable working conditions]. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy: shchokvartalnyi naukovo-vyrobnychiy zhurnal – Electromechanical and energy-saving systems: a quarterly scientific and industrial journal, Vyp. 4(12)*, 94–99 [in Ukrainian].
12. Zinzura, V.V. (2012). Metody rozviazku zadachi bahatokryterialnoi optymizatsii rehuliuвання napruhy v elektrychnykh merezhakh [Methods of solving the problem of multi-criteria optimization of voltage regulation in electric networks.] . *Tekhnika v silskohospodarskomu vyrobnytstvi, haluzeve mashynobuduvannya, avtomatyzatsiia : zb. nauk. prats KNTU – Machinery in Agricultural Production, Industry Machine Building, Automation : Coll. Works of KNTU, Issue 25, part. 1*, 350-360 [in Ukrainian].

Ivan Savelenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Kateryna Petrova**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kotysh**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Sirikov**, Assoc. Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Optimization of Microclimate Parameters in Educational Institutions with air Local Recovery Systems

The aim is to develop an automatic local air recovery system to ensure thermal comfort and the normative composition of the air environment in educational institution premises. Improving the efficiency of local air recovery systems while maintaining optimal microclimate parameters is possible through the enhancement of automatic control systems for local recovery devices.

An automatic air local recovery control system has been developed, which guarantees optimal microclimate parameters in educational institution premises. Computer simulation modeling has been applied to control the microclimate system based on temperature and CO₂ concentration.

The advantages of the proposed system have been identified, which reduced the duration of exceeding the maximum allowable level of CO₂ concentration by 49.5% and decreased the CO₂ concentration by 13.1% within the specified temperature limits.

local air recovery, microclimate, automatic control system, air quality

Одержано (Received) 11.05.2023

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2023

Прийнято до друку (Approved) 29.05.2023