DOI: 10.32347/2076-815x.2025.90.408-424
УДК УДК 697.91; 622.7; 620.133

к.т.н., доцент **Човнюк Ю.В.**,
ychovnyuk@ukr.net, ORCID: 0000-0002-0608-0203,
доцент **Чередніченко П.П.**,
petro_che@ukr.net, ORCID: 0000-0001-7161-661x,
к.т.н., доцент **Москвітіна А.С.**,
moskvitina.as@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0003-3352-0646,
к.т.н., доцент **Рибачов С.Г.,**
rybachov.sg@knuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-0093-9750,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ЗАСТОСУВАННЯ FUZZY-КОНТРОЛЕРІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ, АНАЛІЗУ СИСТЕМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ПРИМІЩЕНЬ СПОРТИВНИХ СПОРУД І ПІДТРИМКИ В НИХ БАЖАНОГО ІНДЕКСУ ДИСКОМФОРТУ

Присвячено актуальній проблемі створення та підтримки оптимального мікроклімату в закритих спортивних споруда. Автори пропонують новий підхід до управління системами кондиціонування повітря, заснований на нейротехнологіях і нечіткій логіці (Neuro & Fuzzy logic). Цей метод особливо ефективний, оскільки не вимагає створення складної математичної моделі об'єкта управління, що є основним недоліком традиційних регуляторів. Центральною ідеєю дослідження є введення узагальненого індексу дискомфорту, який комплексно оцінює стан мікроклімату з урахуванням потреб трьох ключових компонентів: людей, спортивного обладнання та самого приміщення. При цьому встановлюється чіткий пріоритет, де комфорт і безпека відвідувачів мають найвище значення, потім йде збереження дорогого інвентарю, і тільки після цього – норми експлуатації будівлі. Цей пріоритет виражається у вагових коефіцієнтах, які визначають значимість кожного компонента в загальному індексі. Система управління працює на основі нечіткого логічного регулятора, який використовує в якості вхідних даних три лінгвістичні змінні: температуру, вологість і швидкість руху повітря. Ці змінні описуються нечіткими поняттями, такими як «мала», «середня» або «велика», що дозволяє системі гнучко реагувати на зміни. На основі бази правил, розробленої авторами, регулятор формує керуючий вплив на компресор системи кондиціонування, щоб мінімізувати узагальнений індекс дискомфорту. На відміну від класичних систем, які прагнуть підтримувати жорстко задані параметри, даний підхід забезпечує більш робастне (стійке) регулювання. Система не повертається до точних вихідних значень після

зовнішнього збурення, а націлена на підтримку комфортних умов в цілому, що дозволяє значно знизити енерговитрати. Це особливо важливо для приміщень, де мікроклімат залежить від безлічі факторів. Представлена робота є важливим кроком у розвитку інтелектуальних систем управління мікрокліматом. Отримані результати можуть бути використані для розробки та вдосконалення інженерних методів розрахунку систем кондиціонування в спортивних залах, забезпечуючи оптимальні умови для тренувань і мінімізуючи споживання енергії. Таким чином, досягається баланс між комфортом, безпекою та економічністю.

Ключові слова: якість внутрішнього повітря; клімат контроль; енергоефективність; вентиляція; кондиціонування повітря; індекс дискомфорту, інтелектуальні системи управління мікрокліматом.

Постановка проблеми. Розвиток сучасних технологій сприяє підвищенню рівня життя людей, у тому числі трансформує урбаністичне середовище у бік збільшення комфорту перебування у приміщеннях, натомість вирішуючи оптимізаційні завдання споживання енергоресурсів та енергозбереження. Повною мірою це стосується і приміщень спортивних споруд закритого типу, розташованих у сільській місцевості, покликаних зберігати тривалий час у комфортному стані як і саме приміщення (точніше його мікроклімат), де знаходяться люди, так і дороге спортивне обладнання (тренажерні комплекси, різноманітні спортивні снаряди, інвентар та інше) [1].

Для управління сучасними системами кондиціонування повітря приміщень закритих спортивних споруд (ПЗСС) активно застосовуються принципово нові закони регулювання, які отримали назву нейротехнологія і нечітка логіка (Neuro & Fuzzu logic) [2 - 4]. Критерієм функціонування та метою управління в них є сукупність параметрів, які визначає комфорт навколишнього середовища для людини (відвідувача приміщення закритої спортивної споруди), спортивного обладнання (інвентарю, що знаходиться у приміщень закритих спортивних споруд) та власне самого приміщення, в якому відвідувачі та вказане спортивне обладнання знаходяться, за величиною індексу дискомфорту D_n [4, 5]. Система оцінює параметри мікроклімату приміщень закритих спортивних споруд та автоматично вибирає режим роботи. Вибір ґрунтується на практичному аналізі - за зразок беруться і усереднені побажання людей, які користуються цією системою, умови (комфортні) для зберігання спортивного обладнання та норми експлуатації самих приміщень. Величини D_m, $(m = 1,2,3)$ де номер позначається, відповідно, спортивне обладнання (тренажерний комплекс, спортивний снаряд, спортивний інвентар та інше) $(m = 1)$, людське тіло $(m = 2)$, власне саме приміщення закритої спортивної споруди $(m = 3)$,

експлуатоване відповідно до санітарних та інших норм, надалі розглядатимемо за рівнем значущості (від найвищого до нижчого). Величини D_m відображають рівні різних факторів, від значення яких залежать:

1.) комфорт відвідувача приміщень закритих спортивних споруд;

2.) надійна безпека розміщеного в даному приміщенні спортивного обладнання;

3.) різні норми експлуатації приміщень закритих спортивних споруд – це, насамперед, температура, вологість, інтенсивність (швидкість руху) повітряних потоків та інше.

Аналіз публікацій по темі досліджень. Основним перевагою нечіткого логічного регулятора (fuzzy-controller), проти традиційними підходами управління і те, що з проектування контролера не потрібна математична модель об'єкта управління [6-8]. Результати дослідження подібних систем викладено у роботах [9-11]. Ще однією перевагою нечіткого логічного регулятора є їхня стійкість до змін параметрів об'єкта управління, що пояснюється нелінійною природою подібних регуляторів [12-14].

Інший підхід запропонований авторами [15-17]. У цих роботах запропоновано методику розробки комплексної математичної моделі промислового кондиціонера у просторі стану. Методика дозволяє отримати комплексну модель промислового кондиціонера як єдиного багатовимірного об'єкта управління. На основі даної моделі запропоновано методику синтезу лінійно-квадратичного цифрового регулятора, яка враховує логічні перемикання у роботі кліматичного обладнання для модифікованих алгоритмів управління за методами «точки роси». На відміну від існуючих систем, які стабілізують температуру та відносну вологість повітря, запропоновано методику регулювання температури та вологості повітря, що дозволяє зменшити, а в деяких режимах виключити взаємозв'язок між параметрами температури та вологості.

У цій роботі частково використані результати досліджень авторів [18 - 20], проте в основу управління мікрокліматом ПЗСС інша ідея, що сходить до підтримки в цих приміщеннях постійної величини тиску повітря, що залежить від температури вологості повітря, а також швидкості руху потоку повітряних мас.

Основним завданням сучасної кліматологічної техніки є створення комфортних умов життєдіяльності людини, а разі для забезпечення нормального навчально-тренувального процесу у приміщеннях закритих спортивних споруд.

Для оцінки впливу середовища приміщень закритих спортивних споруд на людину, на спортивне обладнання/інвентар, що знаходяться в ньому, а також на саме приміщення в якому знаходиться це дороге сучасне обладнання

(тренажерна система та інші) необхідно визначити не тільки кількісну величину окремих параметрів мікроклімату, а й результати їх загального впливу на людський. Розрахувати вплив одного фактору на окремо взяту людину не важко, набагато складніше розрахувати вплив об'єднання кількох факторів (на відвідувача приміщення, на виставлене днем спортивне обладнання, на приміщення, де вони розміщені). Для формулювання якісного індексу комфорту були раніше введені такі системи оцінки як теплове навантаження середовища (WBGT) [7, 9, 21] та індекс дискомфорту D_i [6, 12, 22]. Відповідно до індексу дискомфорту умови змінюються від комфортної до трохи дратівливих, а потім і до нетерпимості. Саме такий підхід буде використаний у цьому дослідженні стосовно трьох основних компонентів системи, мікроклімат, який слід регулювати, а саме:

1) до відвідувачів приміщень закритих спортивних споруд, що перебувають у ньому на даний момент часу;

2) до спортивного обладнання, виставленого у приміщеннях закритих спортивних споруд;

3) власне до самого приміщення закритих спортивних споруд, де розміщено відвідувачів та спортивне обладнання.

При цьому управління системою що забезпечують нормативні показники мікроклімату приміщень (температура, абсолютна/відносна вологість, швидкість потоку повітряних мас, загальний/парціальний тиск компонентів повітря), здійснюється за певними правилами, відповідно до значних пріоритетів найбільшу відносну цінність представляє відвідувачів приміщень, інвентар та різне обладнання призначене для проведення навчально-тренувальних занять, а на останньому місці норми експлуатації самого приміщення закритих спортивних споруд.

Мета роботи. Розглянути та обґрунтувати алгоритм, що базується на основі підтримки бажаного індексу дискомфорту з використанням нечіткого логічного регулятора (Fuzzy – controller) для систем енергоефективного управління мікрокліматом приміщень спортивних комплексів (таких, наприклад, як фізкультурно-оздоровчі комплекси). Дослідити існуючі методи комплексного енергоефективного керування мікрокліматом приміщень у спортивних спорудах з позиції методів регулювання. Проаналізувати підхід щодо визначення індексу дискомфорту. Розробити базу даних правил на основі розрахованих значень індексу дискомфорту. Теоретично спроектувати інтелектуальну систему автоматичної підтримки комфортних мікрокліматичних умов у приміщеннях спортивного комплексу, для всіх складових системи «приміщення спортивного комплексу – обладнання/інвентар – людина». На основі розрахованих значень індексу дискомфорту для всіх можливих варіантів

значень температур сухого і мокрого термометрів побудувати базу правил для fuzzy – контролера.

Виклад основного матеріалу дослідження. Спочатку з прикладу розглянемо процедуру алгоритму обліку впливу вологості на стан людини. Сприйняття тепла чи прохолоди є наслідком як температури повітря, але його вологості. Для оцінки сумісності впливу температури та вологості на відчуття дискомфорту було введено індекс

$$D_n^{(1)} = 0{,}72_1 \cdot \left(t_{\text{сух}} - t_{\text{вол}}\right) + 40{,}6 \qquad (1)$$

де $t_{\text{сух}}$ – Температура «сухого» термометра, °С; $t_{\text{вол}}$ – температура «мокрого» термометра (обидва термометри входять до складу класичного гігрометра, присутніх у більшості спортивних залах).

Такий підхід добре узгоджується з логічною системою обробки інформації, та «нечітка логіка» (fuzzy logic), Яка застосовується в нечітких логічних регуляторах (НЛР) слід зазначити, що подібні звернення можна перевести і щодо швидкості потоку повітряних мас у приміщенні, де можна ввести індекс оцінки впливу швидкості потоку повітря на відчуття дискомфорту:

$$D_n^{(2)} = 37{,}5 \cdot v_{\text{в}} + 66{,}25 \qquad (2)$$

де $v_{\text{в}}$ – швидкість потоку повітряних мас, м / с.

Нечітка логіка має переваги проти використанням ПІД – регуляторів (PID-regulators) під час обробки дуже складних процесів, нелінійних процесів, під час обробки експертних даних [1, 5, 23]. Таким чином, актуальним є завдання розробки системи управління мікрокліматом приміщень закритих спортивних споруд за допомогою нечіткого логічного регулятора на основі підтримки бажаного ступеня дискомфорту узагальненого індексу дискомфорту, який враховував би комфортні умови перебування в приміщенні закритої спортивної споруди одночасно її відвідувачів і спортивного обладнання/ інвентарю, розміщеного в ньому, і при цьому дотримувалися б усі нормативні правила щодо експлуатації самого приміщення. Нижче в таблиці 1 представлені ступені дискомфорту для людини, визначені за параметрами (1) і (2), які враховують спільний вплив на організм людини трьох провідних факторів, що визначають комфортність перебування в даному приміщенні: температури, вологості та швидкості потоку повітряних мас (при цьому незмінним залишається тиск повітря в даному приміщенні).

Подібні таблиці ступеня дискомфорту можна скласти для спортивного обладнання/інвентарю та нормативних правил експлуатації ПЗСС (відповідно до трьох провідних показників: температури, вологості та швидкості потоку повітряних мас). Надалі і вважатимемо, що формули (1) та (2) відомі (як і таблиця 1) для спортивного обладнання/інвентарю та як норма експлуатації за вказаними параметрами ПЗСС.

Таблиця 1

Ступені дискомфорту для людини відвідувача ПЗСС

Індекс дискомфорту $D_n^{(1)}$, $D_n^{(2)}$	Ступінь дискомфорту
≤ 70	Комфортно
70 ... 75	Деякі відвідувачі ПЗСС почуваються некомфортно
75…80	50% людей у ПЗЗС почуваються некомфортно
80 ... 85	Усі люди у ПЗСС почуваються некомфортно
≥85	Нетерпимий дискомфорт

Будемо надалі позначати: 1.) індексом i_1 – індекс дискомфорту відвідувачів; 2.) індексом i_2 – індекс дискомфорту для спортивного обладнання та інвентарю, що знаходяться в приміщенні; 3) індексом i_3 – індекс дискомфорту для експлуатації приміщення. За існуючими нормами і правилами слід зазначити, що індексація проведена не випадково, а в порядку пріоритетності індексу дискомфорту для всіх трьох компонентів системи «відвідувачі – спортивне обладнання/інвентар – приміщення». Узагальнений індекс дискомфорту такої складної системи, сформований на підставі трьох показників (температура, вологість, швидкість потоку повітряних мас у приміщенні), як показано нижче, також враховує і вагу (впливи) кожного з окремих індексів. Вага конкретного індексу дискомфорту визначається існуючими фахівцями (чи мають досвід експлуатації) приміщень закритих спортивних споруд та устаткування інвентарю для навчально-тренувальних занять, які у них.

Враховуючи складність однозначно визначення оптимальної сукупності параметрів мікроклімату приміщень закритих спортивних споруд у реальному часі для системи «відвідувачі – спортивне обладнання/інвентар – приміщення», що ускладнює процедуру постановки завдань автоматичним регуляторам, перспективним вважатимуться підхід до управління з використанням апарату нечіткої логіки [2, 4, 24]. Використання теорії нечітких множин дозволяє описувати непарне поняття та знання оператора оперувати цими знаннями та робити нечіткі висновки.

Структура системи нечіткого введення полягає в наступному: 1) на вхід системи подається вхідні змінні аналогові сигнали – температури, вологості, швидкості потоку повітряних мас у приміщенні; 2) проводиться фазифікація вхідних змінних у блоці фазифікації; 3) на виході блоку фазифікації виникає вхідні нечіткі змінні (їх у даному випадку три); 4) вхідні нечіткі змінні поступають у блок логічного висновку, де з допомогою бази правил формується вихідна нечітка змінна (індекс дискомфорту, ступінь дискомфорту); 5) вихідна нечітка змінна надходить у блок дефазифікації, на виході якого з'являється вихідна змінна (конкретний аналоговий сигнал, що надходить у виконавчий механізм системи кондиціонування ПЗСС, призначений для регулювання мікроклімату даного приміщення.

Подивимося далі процедуру синтезу нечіткого логічного регулятора для системи кондиціонування приміщень закритих спортивних споруд. Для цього спочатку розглянемо принцип управління кондиціонером для підтримки індексу дискомфорту $D_{ni}, i = \overline{(1,3)}$ у доступних межах (безумовно для кожного компонента досліджуваної системи ця межа кордону «своя» і відрізняється між собою).

По-перше, потужність з якою повинен працювати кондиціонер для охолодження повітря в ПЗЗС визначається бажаною температурою, яку ми хотіли б мати в цьому приміщенні (природно, що слід врахувати всі «інтереси» всіх сторін всіх компонентів системи). Температура в ПЗСС є першою лінгвістичною змінною нечіткого логічного регулятора і може набувати значення «мала», «середня», «велика». Ці значення присвоюються температурі виходячи з перетину меж малих середньої й високих температур всіх компонентів системи і потім виникає узагальнення «мала», «середня», «велика». Ці значення присвоюються температурі виходячи з перетину меж малих середніх і високих температур всіх компонентів системи і потім виникає узагальнена «мала», «середня», «велика» температура приміщення, яка вже як поняття застосовується для всіх сукупних компонентів системи. Приймемо умовно діапазон змін показань сухого термометра для фітнес-залу від 16 ° С до 30 ° С.

По-друге, як вже було зазначено раніше, зручні кліматичні умови в приміщенні закритих спортивних споруд визначається не тільки температурою повітря, а й його відносною/абсолютною вологістю, а також швидкістю переміщення повітряних мас. З приводу останньої, всі розподіли аналогічні наведеним вище для температури приміщень закритих спортивних споруд. Тому швидкість переміщення повітряних мас є другою лінгвістичною змінною. Зауважимо, що для комфортного перебування людей у приміщенні швидкість

переміщення повітряних мас відповідно до (2) повинна лежати в межах $v_в = 0{,}1 \ldots 0{,}5$м/с.

Третьою лінгвістичною змінною нечіткого логічного регулятора є вологість або температура «мокрого» термометра гігрометра, яка фігурує у формулі (1) і разом із показаннями сухого термометра однозначно визначає вологість у приміщеннях закритих спортивних споруд. Діапазон змін температури «мокрого» термометра є більшим, ніж діапазон змін «сухого» термометра, тому лінгвістичних змінних третього типу по вологості буде більше: «дуже низька», «низька», «задовільно низька», «задовільно висока», «висока», «дуже висока» (тут доречні міркування, що й викладені вище щодо узагальнення понять лінгвістичної змінної для всіх компонентів системи).

Для визначення ваги і пріоритетності в оцінці узагальненого індексу дискомфорту системи використовуємо підходи і результати роботи [8, 25-27], в яких запропоновано спосіб завдання пріоритету локальних критеріїв. При цьому будемо керуватися існуючими експертними оцінками характеристик пріоритету для випадку, що досліджується в даній роботі (система «відвідувачі» - «спортивне обладнання/інвентар» - «приміщення»).

До основних характеристик пріоритету відносяться наступні три: 1) ряд пріоритету – I; 2) вектор пріоритету – IV; 3) вектор вагових коефіцієнтів – Λ.

За експертними оцінками, в досліджуваному випадку для даного спортивного залу маємо: $\mathrm{I} = (1,2,3)$, $V = (4,2,1)$. Компоненти вектору $V = (v_1, v_2, v_3) = (4,2,1)$, а компоненти вагового вектору $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ можуть бути обчислені за формулою [9, 26, 27]:

$$\lambda_q = \frac{\prod_{i=q}^{k} \gamma_i}{\sum_{q=1}^{k} \prod_{i=q}^{k} \gamma_i}, q = \overline{(1,3)} \qquad (3)$$

тому ваговий вектор Λ має наступне значення: $\lambda_1 = 0{,}7272$, $\lambda_2 = 0{,}1818$, $\lambda_3 = 0{,}0909$.

Далі визначимо для підрахунку узагальненого індексу дискомфорту системи «відвідувачі – спортивне обладнання/інвентар – приміщення (приміщення закритих спортивних споруд)» $\mathrm{D}_{\mathrm{n}}^{(\mathrm{gen})}$:

$$\mathrm{D}_{\mathrm{nj}}^{(\mathrm{gen})} = \sum_{i=1}^{3} \lambda_i \cdot \mathrm{D}_{\mathrm{ni}}^{(\mathrm{j})}, , , i = \overline{(1,3)} \mathrm{j} = (1,2) \qquad (4)$$

Тут $\mathrm{D}_{\mathrm{ni}}^{(\mathrm{j})}, i = \overline{(1,3)}$, позначені індекси дискомфорту, відповідно для відвідувачів, спортивного обладнання/інвентарю, приміщення спортивної зали. Кожен з них, у свою чергу, визначається або за формулою (1) $(\mathrm{j} = 1)$, або за

формулою (2) $(j = 2)$, тобто для температурних та вологих показників $(j = 1)$ або для показника швидкості руху потоків повітря $(j = 2)$. Тому в результаті маємо

$$D_{ni}^{(1)} = A_1 \cdot \left(t_{сух} - t_{вол}\right) + B_i, \quad i = \overline{(1,3)} \tag{5}$$

де емпіричні коефіцієнти A_i, B_i визначені для кожної складової розглянутої системи окремо і інтегрують в собі багато інших залежностей, які, в кінцевому рахунку, визначають індекс дискомфорту конкретного компонента системи. Визначення зазначених емпіричних коефіцієнтів є окремим завданням і вимагає окремого спеціального дослідження. Тут представлені лише концептуальні основи розробки алгоритмів функціонування нечіткого логічного регулятора.

Для індексу дискомфорту $D_{ni}^{(2)}$ маємо таке співвідношення:

$$D_{ni}^{(2)} = E_i \cdot v_B + F_i, \quad i = \overline{(1,3)} \tag{6}$$

де емпіричні коефіцієнти E_i, F_i визначаються для кожної складової, розглядаючи системи окремо, а алгоритм їх визначення аналогічний наведеному вище для коефіцієнтів A_i, B_i.

Маючи значення $D_{nj}^{(gen)}$ для $j = (1,2)$, можна знайти значення індексу дискомфорту для всіх трьох лінгвістичних змінних, користуючись операцією диз'юнкції (перетину) множин D_{nj} між собою, тобто:

$$D_n^{(gen)} = D_{n1}^{(gen)} \bigcap D_{n2}^{(gen)} \tag{7}$$

вихідною величиною нечіткого логічного регулятора є керуюча дія на компресор холодильної машини, якій присвоюється наступні терміни: "велика негативна" (NB), "негативна" (N), "нульова" (ZE), "позитивна" (P), "велика позитивна" (PB). Тобто, за комфортних умов керуюча дія відсутня, і компресор працює у спортивному залі із заданою потужністю. За наявності відхилень від комфортних умов нечіткий логічний регулятор виробляє керуючу дію у бік збільшення або зменшення потужності компресора до тих пір, поки не буде компенсовано негативне збурення мікроклімату приміщення і всієї системи в цілому.

У таблиці 2 наведено базу правил нечіткого логічного регулятора підтримки мікроклімату приміщень закритих спортивних споруд.

Як алгоритм нечіткого висновку тут використовується алгоритм Мамдані [10] або алгоритм «мінімаксного висновку». Для розрахунку результуючої непарної множини вихідної змінної в цьому алгоритмі використовується операція логічного мінімуму (min) на етапі нечіткого висновку і операції логічного максимуму (max) на етапі композиції.

Комп'ютерне моделювання системи регулювання мікроклімату приміщень закритих спортивних споруд можна проводити, наприклад, в середовищі Simulink MATLAB з використанням блоку Fuzzy Logic Controller with Rule Viewer для реалізації нечіткого логічного регулювання даного типу.

Таблиця 2

База правил нечіткого логічного регулятора

$\begin{Bmatrix} t_{сух}, °C; \\ v_в, м/с \end{Bmatrix}$	Температура «мокрого» термометра, °C					
	Дуже мала (6-11)	Мала (12-14)	Задовільно мала (15-18)	Задовільна (19-21)	Велика (22-25)	Дуже велика (26-29)
Мала $\begin{Bmatrix} 16-21; \\ 0,1-0,2 \end{Bmatrix}$	N	N	ZE	ZE	-	-
Середня $\begin{Bmatrix} 22-25; \\ 0,21-0,4 \end{Bmatrix}$	N	ZE	ZE	P	P	-
Велика $\begin{Bmatrix} 26-30; \\ 0,41-0,5 \end{Bmatrix}$	ZE	ZE	P	P	P	PB

Висновки

1. У системі з регулятором нечіткої логіки температура установки постійно коригується виходячи з поточних значень температури «сухого» і «мокрого» термометра, швидкості руху повітряних мас і постійності тиску в приміщеннях закритих спортивних споруд. Підтримка мінімального допустимого узагальненого індексу дискомфортності спортивних споруд забезпечує зниження загальних енерговитрат і усуває непотрібні регулюючі дії при малих відхиленнях вимірюваних параметрів, якими є температура, вологість (абсолютна/відносна), швидкість руху повітряних мас, тиск (загальний і парціальний) повітря і водяної пари в спортивних спорудах.

2. Розглянута система регулювання мікроклімату в приміщеннях закритих спортивних споруд на основі визначення узагальненого індексу дискомфорту забезпечує комфортні умови перебування людини, спортивного обладнання/інвентарю, за допомогою яких можливе здійснення навчально-тренувальної діяльності людей, які одночасно перебувають у даному місці та в даний момент часу, а також задовольняючи всім нормам експлуатації

приміщень закритих спортивних споруд, викладених в інструктивних документах.

3. Хоча зазначена система і забезпечує більш грубе регулювання (робастне) по відношенню до прямих змін параметрів, проте, вона здатна забезпечити комфортні мікрокліматичні умови ПЗСС, завдяки закладеній в нечіткому логічному регуляторі базі правил.

4. При експлуатації даної системи регулювання мікроклімату приміщень закритих спортивних споруд неминуче виникають перехідні процеси і тому параметри не повертаються до тих значень, які були перед нанесенням збурення, як це можна спостерігати в класичних системах з ПІ- і ПІД-регуляторами. Але, з іншого боку, в даній системі і немає конкретної установки температури «сухого» і «мокрого» термометра (гігрометра в спортивній споруді), швидкості потоку повітряних мас, а параметри, які регулюються, по суті, є узагальненим індексом дискомфорту $D_n^{(gen)}$ який є непрямим показником і розраховується на основі обох температур для даної швидкості.

5. Отримані в цій роботі результати можуть бути використані для уточнення та вдосконалення інженерних методів розрахунку параметрів системи управління мікрокліматом приміщень закритих спортивних споруд, наприклад, фітнес-залів, за допомогою регуляторів нечіткої логіки як на стадіях їх проектування або конструювання, так і в режимах реальної експлуатації із забезпеченням мінімальних енерговитрат.

Бібліографічний список:

1. Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Москвітіна А.С., Васильєва Г.Ю. Енергоефективне управління мікрокліматом спортивного залу з врахуванням показників комфорту і якості повітря при роботі вентиляції за потребою і зеленої стіни. Просторовий розвиток: Науковий збірник. Випуск 13. К.: КНУБА. 2025. С. 406-421. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.406-421

2. Azzedine Hamza, Messaoud Ramdani. Non-PDC Interval Type-2 Fuzzy Model Predictive Microclimate Control of a Greenhouse. Journal of Control Automation and Electrical Systems. 2020. V 31 P. 62-72.

3. Sebastian-Camilo Vanegas-Ayala, Julio Bar´on-Velandia, and Daniel-David Leal-Lara. A Systematic Review of Greenhouse Humidity Prediction and Control Models Using Fuzzy Inference Systems.// Advances in Human-Computer Interaction. Volume 2022. P. 1-16.

4. Saatchi R. Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation.// Information. 2024. 15, 656 P 1-24.

5. Hangyao Wu, Zeshui Xu. Fuzzy Logic in Decision Support: Methods, Applications and Future Trends. International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC). 2020. P 1-28.

6. Limainla Kichu, Fokrul Alom Mazarbhuiya. Fuzzy logic and its applications a brief review// Journal of Applied and Fundamental Sciences 2021. Vol. 7(1). P. 37-40.

7. Renu Makkar. Application of fuzzy logic: A literature review. International Journal of Statistics and Applied Mathematics 2018; Vol. 3(1): 357-359.

8. Poonam Gupta. Applications of Fuzzy Logic in Daily life.// International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2017. Vol. 8(5) P 1795-1800..

9. TRČKA, Marija; HENSEN, Jan LM. Overview of HVAC system simulation. Automation in construction, 2010, №19.2. P.93-99.

10. Kulis C., Muller I. Indoor air quality improvement in natyral ventilation using a fuzzy logic controller. Technical transactions. Cracow University of technology №. 2020/045. P.P. 1-15.

11. Bova S. Logical analysis of Mammdam-type Fuzzy Inference, 1 Theoretical Bases/ S. Bova, P. Codara, D. Maccari, V. A. Marra// IEEE International Confernce on Fuzzy Systems, Barcelona, 2010. P 1-8.

12. Siham A. M. Almasani. Fuzzy Expert systems to Control the Heating. Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems/Siham A.M. Almasani, Wadeea, A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A. A. Alqubati//International journal of engineering Research Techology (IJERT). 2015 Vol.4. P.P 808-815.

13. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Serhii Rybachov, Petro Zinych. Nonisothermal flow of nanofluid in ground heat accumulator for decentralized heat supply of rural facilities for various purposes. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.May 22-24, 2024. Vol.23. P.623-629.

14. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Mania Shyshyna, Serhii Rybachov, Olha Mykhailyk. Optimization of heat transfer processes in enclosing structures of architectural monuments located outside urban agglomeration. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.May 22-24, 2024. Vol.23. P. 615-622.

15. Bolton, D. (1980) The Computation of Equivalent Potential Temperature. Monthly Weather Review, 108, 1046-1053.

16. Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Москвітіна А.С. Моделювання та алгоритм розрахунку параметрів системи регулювання мікроклімату приміщення з елементами штучного інтелекту. Містобудування та територіальне планування. Випуск 79. К.: КНУБА. 2022. С. 446-462. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2022.79.446-462

17. Човнюк Ю.В., Чередніченко П.П., Москвітіна А.С., Золотар Л.В. Інноваційний метод дослідження динаміки зміни забрудненості та вологості повітря спортивних споруд: фітнес-зали та плавальні басейни. Містобудування та територіальне планування. Випуск 83. К.: КНУБА. 2023. С. 374–385. DOI: https://doi.org/10.32347/2076-815x.2023.83.374-385

18. Москвітіна А.С., Шишина М.О. Дослідження поля температур у приміщенні при роботі систем кондиціонування при змінних теплових навантаженнях приміщення. Молодий вчений - Випуск 3(79). 2020. С. 186-192. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-3-79-40

19. Москвітіна, А.С., Шишина М.О., Корчмінський М. Техніко-економічне та екологічне обґрунтування використання систем зі змінною витратою повітря для адміністративних будівель. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: науково-технічний збірник. Випуск 36.К.: КНУБА, 2021. С.62-79. DOI: https://doi.org/10.32347/2409-2606.2021.36.62-79

20. Dovhaliuk V., Mileikovskyi V. New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. №. 3. P. 591-596.

21. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Oleksandr Shamych, Olesia Kholodova. Synthesis of physical and mathematical model of energy-efficient microclimate management of rural area gym, taking into account indicators of comfort and air quality. Engineering for Rural Development 21-23.05.2025 Jelgava, LATVIA. Vol. 24 P. 706-715.

22. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Oleksandr Shamych, Serhii Rybachov, Olesia Kholodova. Improvement of microclimate control energy-saving systems at indoor sports facilities in rural areas. Engineering for Rural Development 21-23.05.2025 Jelgava, LATVIA. Vol. 24 P. 764-771.

23. Pease, P.; Chhabra, J.; Zolfaghari, Z. Planning for net zero by 2050, what HVAC system interventions will today’s code minimum commercial buildings require? arXiv 2021, arXiv:2111.03899.

24. Приймаченко О.В., Москвітіна А.С., Бистров Д.О. Використання нечіткої логіки для управління vav-системою кондиціонування повітря в поєднанні з зеленою стіною. Просторовий розвиток. Випуск 10. К.: КНУБА, 2024 С.389–406. DOI: https://doi.org/10.32347/2786-7269.2024.10.389-406

25. Grahame M. Budd. Wet-bulb Globe Temperature (WBGT)-Its History and Its Limitation. Journal of Sciece and Medicine in Sport. 2008 Vol 11. p. 20-32.

26. Thom E.C. The discomfort index. Weather wise. 1959 Vol. 12. P. 57-60.

27. Mamdani E. H. Application of Fazzy Logic to approximate Reasoning using Linguistic Synthesis. IEEE Trans. Comput V. C. – 26 1976 № 12. p 1182-1191.

PhD, associate professor **Chovniuk Yuriy,**
Associate Professor **Cherednichenko Petro,**
PhD, Associate Professor **Moskvitina Anna,**
PhD, Associate Professor **Rybachov Serhii,**
Kyiv National University of Construction and Architecture

APPLICATION OF FUZZY CONTROLLERS FOR MODELLING, ANALYSIS OF ENERGY-EFFICIENT MICROCLIMATE CONTROL SYSTEMS IN SPORTS FACILITIES AND MAINTAINING THE DESIRED DISCOMFORT INDEX IN THEM

The article is devoted to the topical problem of creating and maintaining an optimal microclimate in indoor sports facilities. The authors propose a new approach to air conditioning system management based on neurotechnology and fuzzy logic (Neuro & Fuzzy logic). This method is particularly effective because it does not require the creation of a complex mathematical model of the control object, which is the main drawback of traditional controllers. The central idea of the study is the introduction of a generalised discomfort index, which comprehensively assesses the state of the microclimate, taking into account the needs of three key components: people, sports equipment and the premises themselves. At the same time, a clear priority is established, where the comfort and safety of visitors are of the highest importance, followed by the preservation of expensive equipment, and only then – the operating standards of the building. This priority is expressed in weighting coefficients that determine the significance of each component in the overall index. The control system operates on the basis of a fuzzy logic controller that uses three linguistic variables as input data: temperature, humidity, and air velocity. These variables are described by fuzzy concepts such as ‘low,’ ‘medium,’ or ‘high,’ which allows the system to respond flexibly to changes. Based on a rule base developed by the authors, the controller exerts a controlling influence on the air conditioning system compressor to minimise the generalised discomfort index. Unlike classical systems, which strive to maintain rigidly defined parameters, this approach provides more robust (stable) control. The system does not return to the exact initial values after an external disturbance, but aims to maintain comfortable conditions in general, which significantly reduces energy consumption. This is especially important for rooms where the microclimate depends on many factors. This work is an important step in the development of intelligent microclimate control systems. The results obtained can be used to develop and improve engineering methods for calculating air conditioning systems in sports halls, ensuring optimal conditions for training and

minimising energy consumption. This achieves a balance between comfort, safety and economy.

Keywords: indoor air quality; climate control; energy efficiency; ventilation; air conditioning; discomfort index; intelligent microclimate control systems.

REFRENCE:

1. Chovnyuk YU.V., Cherednichenko P.P., Moskvitina A.S., Vasyl′yeva H.YU. Enerhoefektyvne upravlinnya mikroklimatom sportyvnoho zalu z vrakhuvannyam pokaznykiv komfortu i yakosti povitrya pry roboti ventylyatsiyi za potreboyu i zelenoyi stiny. Prostorovyy rozvytok: Naukovyy zbirnyk. Vypusk 13. K.: KNUBA. 2025. P. 406-421. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.406-421 {in Ukrainian}

2. Azzedine Hamza, Messaoud Ramdani. Non-PDC Interval Type-2 Fuzzy Model Predictive Microclimate Control of a Greenhouse. Journal of Control Automation and Electrical Systems. 2020. V 31 P. 62-72. { in English }

3. Sebastian-Camilo Vanegas-Ayala, Julio Bar´on-Velandia, and Daniel-David Leal-Lara. A Systematic Review of Greenhouse Humidity Prediction and Control Models Using Fuzzy Inference Systems.// Advances in Human-Computer Interaction. Volume 2022. P. 1-16. { in English }

4. Saatchi R. Fuzzy Logic Concepts, Developments and Implementation.// Information. 2024. 15, 656 P 1-24. { in English }

5. Hangyao Wu, Zeshui Xu. Fuzzy Logic in Decision Support: Methods, Applications and Future Trends. International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC). 2020. P 1-28. { in English }

6. Limainla Kichu, Fokrul Alom Mazarbhuiya. Fuzzy logic and its applications a brief review// Journal of Applied and Fundamental Sciences 2021. Vol. 7(1). P. 37-40. { in English }

7. Renu Makkar. Application of fuzzy logic: A literature review. International Journal of Statistics and Applied Mathematics 2018; Vol. 3(1): 357-359. { in English }

8. Poonam Gupta. Applications of Fuzzy Logic in Daily life.// International Journal of Advanced Research in Computer Science. 2017. Vol. 8(5) P 1795-1800. { in English }

9. TRČKA, Marija; HENSEN, Jan LM. Overview of HVAC system simulation. Automation in construction, 2010, №19.2. P.93-99. { in English }

10. Kulis C., Muller I. Indoor air quality improvement in natyral ventilation using a fuzzy logic controller. Technical transactions. Cracow University of technology №. 2020/045. P.P. 1-15. { in English }

11. Bova S. Logical analysis of Mammdam-type Fuzzy Inference, 1 Theoretical Bases/ S. Bova, P. Codara, D. Maccari, V. A. Marra// IEEE International Confernce on Fuzzy Systems, Barcelona, 2010. P 1-8. { in English }

12. Siham A. M. Almasani. Fuzzy Expert systems to Control the Heating. Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems/Siham A.M. Almasani, Wadeea, A. A. Qaid, Ahmed Khalid, Ibrahim A. A. Alqubati//International journal of engineering Research Techology (IJERT). 2015 Vol.4. P.P 808-815. { in English }

13. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Serhii Rybachov, Petro Zinych. Nonisothermal flow of nanofluid in ground heat accumulator for decentralized heat supply of rural facilities for various purposes. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.May 22-24, 2024. Vol.23. P.623-629. { in English }

14. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Mania Shyshyna, Serhii Rybachov, Olha Mykhailyk. Optimization of heat transfer processes in enclosing structures of architectural monuments located outside urban agglomeration. Contents of Proceedings of 23rd International Scientific Conference ENGINEERING FOR RURAL DEVELOPMENT.May 22-24, 2024. Vol.23. P. 615-622. { in English }

15. Bolton, D. (1980) The Computation of Equivalent Potential Temperature. Monthly Weather Review, 108, 1046-1053. { in English }

16. Chovnyuk YU.V., Cherednichenko P.P., Moskvitina A.S. Modelyuvannya ta alhorytm rozrakhunku parametriv systemy rehulyuvannya mikroklimatu prymishchennya z elementamy shtuchnoho intelektu. Mistobuduvannya ta terytorial′ne planuvannya. Vypusk 79. K.: KNUBA, 2022. P. 446-462. {in Ukrainian}

17. Chovnyuk YU.V., Cherednichenko P.P., Moskvitina A.S., Zolotar L.V. Innovatsiynyy metod doslidzhennya dynamiky zminy zabrudnenosti ta volohosti povitrya sportyvnykh sporud: fitnes-zaly ta plaval′ni baseyny. Mistobuduvannya ta terytorial′ne planuvannya. Vypusk 83. K.: KNUBA. 2023. P. 374–385. {in Ukrainian}

18. Moskvitina A. S., Shyshyna M.O. Doslidzhennya polya temperatur u prymishchenni pry roboti system kondytsionuvannya pry zminnykh teplovykh navantazhennyakh prymishchennya. Molodyy vchenyy - Vypusk 3(79). 2020. P. 186-192. {in Ukrainian}

19. Moskvitina, A.S., Shyshyna M.O., Korchmins′kyy M. Tekhniko-ekonomichne ta ekolohichne obgruntuvannya vykorystannya system zi zminnoyu vytratoyu povitrya dlya administratyvnykh budivel′. Ventylyatsiya, osvitlennya ta teplohazopostachannya: naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vypusk 36.K.: KNUBA, 2021. P.62-79. {in Ukrainian}

20. Dovhaliuk V., Mileikovskyi V. New approach for refined efficiency estimation of air exchange organization. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7. №. 3. P. 591-596. { in English }

21. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Oleksandr Shamych, Olesia Kholodova. Synthesis of physical and mathematical model of energy-efficient microclimate management of rural area gym, taking into account indicators of comfort and air quality. Engineering for Rural Development 21-23.05.2025 Jelgava, LATVIA. Vol. 24 P. 706-715. { in English }

22. Yurii Chovniuk, Anna Moskvitina, Oleksandr Shamych, Serhii Rybachov, Olesia Kholodova. Improvement of microclimate control energy-saving systems at indoor sports facilities in rural areas. Engineering for Rural Development 21-23.05.2025 Jelgava, LATVIA. Vol. 24 P. 764-771. { in English }

23. Pease, P.; Chhabra, J.; Zolfaghari, Z. Planning for net zero by 2050, what HVAC system interventions will today's code minimum commercial buildings require? arXiv 2021, arXiv:2111.03899. { in English }

24. Pryymachenko O.B., Moskvitina A.S., Bystrov D.O. Vykorystannya nechitkoyi lohiky dlya upravlinnya vav-systemoyu kondytsionuvannya povitrya v poyednanni z zelenoyu stinoyu. Prostorovyy rozvytok. Vypusk 10. K.: KNUBA, 2024 P.389–406. {in Ukrainian}

25. Grahame M. Budd. Wet-bulb Globe Temperature (WBGT)-Its History and Its Limitation. Journal of Sciece and Medicine in Sport. 2008 Vol 11. p. 20-32. { in English }

26. Thom E.C. The discomfort index. Weather wise. 1959 Vol. 12. P. 57-60. { in English }

27. Mamdani E. H. Application of Fazzy Logic to approximate Reasoning using Linguistic Synthesis. IEEE Trans. Comput V. C. – 26 1976 № 12. p 1182-1191. { in English }