

УДК 697.94:681.5:004.7

д.т.н., проф., **Наталія Швагер**,
shwager.n@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9986-8605,

к.т.н., доцент **Микола Худик**,
khudyk.mykola@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1155-2535

Криворізький національний університет

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.75-91>

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВОЛОГІСНИМ РЕЖИМОМ ПРОМИСЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ НА ОСНОВІ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ ТА АДАПТИВНОЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛОТИ

***Анотація.** Промислові приміщення з інтенсивними тепловими та нестабільними вологісними виділеннями, зокрема сушильні, збагачувальні, металургійні, скляні й харчові цехи, характеризуються значною мінливістю параметрів повітряного середовища протягом робочої зміни. Зміна теплових і вологісних навантажень зумовлена особливостями технологічних процесів, режимами роботи обладнання, а також впливом зовнішніх кліматичних умов. За таких обставин традиційні системи вентиляції та кондиціонування, що працюють у фіксованих режимах і не враховують інерційність об'єкта та взаємозв'язок температури й вологості, часто не забезпечують стабільного мікроклімату та призводять до підвищеного енергоспоживання, перерегулювань і нестійких режимів осушення або зволоження. Метою роботи є розроблення інженерної концепції автоматизованого керування тепловологісним режимом, яка поєднує багатоточкове сенсорне спостереження параметрів мікроклімату, перехід від відносної вологості до вологовмісту й температури точки роси, керувану рекуперацію теплоти та гібридну стратегію керування, де локальні контури пропорційно інтегрально диференційного регулювання доповнюються верхнім рівнем оптимізації з прогнозуванням. Узагальнено підходи до керування за потребою, прогнозного керування та інтегрованого контролю вологості. Запропоновано трирівневу архітектуру з вимірюванням температури, відносної вологості, концентрації CO₂, швидкості руху повітря та перепаду тиску на фільтрах, локальною стабілізацією з блоком безпеки за точкою роси та оптимізацією продуктивності вентиляторів, байпаса рекуператора і режимів зволоження або осушення. Показано, що керована рекуперація є не лише засобом енергозбереження, а й керованим інструментом стабілізації параметрів припливного повітря. Модельне порівняння трьох стратегій керування підтвердило, що гібридний підхід зменшує відхилення температури й вологості,*

скорочує тривалість виходу за допустимі межі та знижує інтегральні енерговитрати на підготовку припливного повітря.

Ключові слова: *автоматизація; мікроклімат; відносна вологість; теплопередача; рекуперація теплоти; сенсорна мережа; керування вентиляцією; точка роси; енергоефективність*

Вступ. Незважаючи на розвиток засобів автоматизації, у промисловій практиці системи вентиляції та підготовки повітря часто функціують за фіксованими або слабо-адаптивними алгоритмами керування, орієнтованими на нормативні або проєктні значення повітрообміну. Такий підхід не враховує динамічну взаємодію внутрішніх надходжень теплоти та вологи, інфільтрації, теплообміну з огорожувальними конструкціями та змінних зовнішніх умов.

У результаті виникають розрегулювання параметрів мікроклімату, локальні зони застою або протягів, відхилення відносної вологості повітря від оптимального діапазону й підвищене енергоспоживання систем вентиляції та кондиціонування повітря. Особливо складним є завдання інтегрованого керування температурою та вологістю, оскільки відносна вологість повітря є функцією температури та вмісту водяної пари і не може розглядатися як незалежна керована змінна. Додаткові обмеження пов'язані з роботою теплоутилізаторів, для яких характерні ризики обмерзання, зміни аеродинамічного опору та перенесення вологи.

Таким чином, існує науково-прикладна проблема розроблення узгодженої концепції автоматизованого керування тепловологісним режимом промислових приміщень, що забезпечує:

- прогнозування змін навантаження;
- інтегроване регулювання температури та вологості;
- адаптивне керування теплоутилізацією;
- мінімізацію енергетичних витрат за умови дотримання нормативних параметрів мікроклімату.

Розв'язання цієї проблеми потребує формування структурної та математичної моделі системи керування, здатної враховувати динамічні властивості об'єкта та реалізовувати оптимізаційні алгоритми з прогнозним горизонтом.

Актуальність дослідження. Параметри мікроклімату у виробничих приміщеннях безпосередньо впливають на працездатність персоналу, рівень виробничої безпеки, ризики професійних захворювань та стабільність технологічних процесів. Для промислових об'єктів характерними є високі локальні теплові потоки від обладнання, значні об'єми повітрообміну, наявність пилу й аерозолів, а також змінні режими роботи, що формують складну та динамічну структуру тепловологісного балансу. У теплий період року виникає

ризик перегрівання робочої зони, у холодний – зниження температури за умов підвищеного повітрообміну та зростання витрат енергії на підігрівання припливного повітря. Відносна вологість як інтегральний параметр стану повітряного середовища визначає умови конденсації, корозійні процеси, зміну фізико-механічних властивостей матеріалів та теплові відчуття працівників.

Сучасні дослідження [1-4], підтверджують тісний взаємозв'язок між параметрами мікроклімату, продуктивністю праці та енергоефективністю будівель. Активний розвиток сенсорних технологій, частотно-керованих електроприводів і систем диспетчеризації створив технічні передумови для переходу від фіксованих режимів вентиляції до адаптивного керування за потребою. Перспективним напрямом вважається застосування методів прогнозного керування (Model Predictive Control), ефективність яких у сфері опалення, вентиляції та кондиціонування повітря доведено в роботах [5] і [6].

Разом з тим, для промислових приміщень питання інтегрованого керування температурою, відносною вологістю повітря та теплоутилізацією з урахуванням їхньої взаємозалежності та інерційності системи залишається недостатньо опрацьованим. Це визначає необхідність розроблення комплексних підходів до автоматизованого регулювання тепловологісного режиму з одночасним забезпеченням енергоефективності та нормативних показників якості повітря.

Останні дослідження та публікації. Автоматизація мікроклімату історично розвивалась у двох напрямках, що передбачали підвищення точності підтримання температури та забезпечення якості повітря шляхом контролювання вентиляції. Сучасні огляди методів моделювання й керування системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря підтверджують еволюцію від класичних регуляторів до інтелектуальних алгоритмів оптимізування [7], [8], [9]. Для житлових і громадських будівель домінують питання енергетичної ефективності та теплового комфорту, тоді як для промисловості до цього долучаються чинники технологічної безпеки, локальні джерела теплоти та вологи, забруднення повітря, агресивні середовища, а також підвищені вимоги до надійності давачів і виконавчих механізмів [9], [10]. Вплив температурних умов на продуктивність праці та трудову активність підтверджено в дослідженнях [11], що підсилює значущість стабілізування мікроклімату в умовах виробництва.

Найпоширенішим підходом у промислових системах є використання пропорційно-інтегрально-диференціальних регуляторів (Proportional – Intergal – Differential, PID-регуляторів) для підтримання температури припливного повітря та, рідше, для регулювання відносної вологості. Такий підхід широко описаний у роботах щодо аналізу та оптимізування систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря [7], [8]. Перевагами PID-керування є простота

налаштування та передбачуваність поведінки, однак його ефективність знижується за наявності значних запізнь і нелінійної взаємодії температури та відносної вологості повітря. Практичні реалізації каскадного керування температурою та відотною вологістю, зокрема на рівні припливно-витяжних установок (АНУ), наведені в патентному рішенні [12], де враховано взаємний вплив цих параметрів.

Керування за потребою (Demand Controlled Ventilation) розглядається як один із ключових напрямів підвищення енергоефективності. Дослідження у сфері моніторингу параметрів повітря, зокрема концентрацій домішок та іонного складу, підтверджують доцільність застосування розширених мереж датчиків для адаптивного регулювання вентиляції [13]. Для промислових умов керування за потребою має поєднуватися з контролюванням пилу, температури та відносної вологості повітря, а також з урахуванням технологічних режимів роботи обладнання, що відзначено в сучасних дослідженнях щодо вдосконалення мікроклімату виробничих приміщень [9].

Одним з найбільш активно досліджуваних напрямів є прогнозне керування (Model Predictive Control – MPC), яке дозволяє враховувати обмеження та оптимізувати енергоспоживання системи. Систематизація сучасних методів моделювання та керування системами опалення, вентиляції та кондиціонування повітря наведена в роботах [7], [8], де підкреслюється перевага моделей, що враховують динаміку тепломасообміну та змінні навантаження. Для промислових об'єктів потенціал прогнозних підходів зростає за умови можливості врахування режимів роботи технологічного обладнання як внутрішніх збурювальних факторів.

Окремим складним напрямом є автоматичне контролювання відносної вологості повітря. Проблематика надлишкової відносної вологості у виробничих будівлях, зокрема у випадках інтенсивного вологоутворення, розглянута в роботі [14], де запропоновано використання теплового насоса для поєднання вентиляції та осушення повітря. Сучасні огляди технологій осушення, зокрема твердоесикантні системи та методи регенерування, наведені у [15], [16], що підтверджує актуальність інтеграції контролювання абсолютної вологості й точки роси в структуру керування. Дослідження ефективності багатоступеневих систем рідинного осушення наведені в [17], де показано можливість зниження енерговитрат за рахунок оптимізування процесів тепломасообміну.

З позиції тепломасообміну керування вологою потребує поєднання методів охолодження нижче точки роси, адсорбційного осушення або комбінованих схем, що підтверджено сучасними оглядовими роботами [15], [16]. Вибір конкретної технології визначається вимогами до відносної вологості повітря,

доступністю теплових ресурсів та енергоефективністю системи.

Енергоефективність систем мікроклімату значною мірою залежить від рівня утилізації вторинних теплових ресурсів. Зокрема, у дослідженні [14] обґрунтовано доцільність інтеграції теплових насосів із вентиляційними системами промислових будівель з надлишковою відносною вологістю повітря, що дозволяє поєднати процеси вентиляції та осушення з теплоутилізацією. Водночас ефективність повторного використання теплоти потребує врахування обмежень за точкою роси та аеродинамічних параметрів, які мають бути інтегровані в систему автоматизованого керування.

Отже, аналіз літературних джерел [7–17] свідчить, що для промислових умов доцільним є гібридний підхід, який поєднує локальні контури PID-керування [7], [8], каскадні або комбіновані схеми регулювання температури й відносної вологості повітря [12], адаптивне керування вентиляцією на основі сенсорного моніторингу [9], [13] та оптимізування процесів осушення й теплоутилізації [14–17]. Разом з тим, методичне поєднання психрометрично коректного керування відносною вологістю повітря, вибирання сенсорної структури та формування показників ефективності для промислових приміщень потребують подальшого інженерного обґрунтування з урахуванням реальних режимів роботи виробництва.

Формулювання цілей статті. Метою статті є розроблення та наукове обґрунтування концепції автоматизованого керування тепловологісним режимом промислових приміщень з урахуванням взаємозалежності температури, абсолютної та відносної вологості, інерційності об'єкта та змінних внутрішніх і зовнішніх збурювальних чинників.

Основна частина. Нормативні вимоги до мікроклімату у виробничих приміщеннях задаються чинними санітарними та будівельними нормами, що регламентують значення температури, відносної вологості та швидкості руху повітря з урахуванням категорії робіт і періоду року [18–21]. Додатково в практиці проектування та оцінювання теплового комфорту застосовуються міжнародні стандарти [22], що використовують індекси PMV/PPD та критерії локального дискомфорту, а також документи щодо параметрів внутрішнього середовища для енергетичного моделювання та добору систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря.

У дослідженні використано аналітичні та розрахункові методи для формування концепції автоматизованого керування тепловологісним режимом. Базовий об'єкт керування подано як об'єм приміщення V , м³, у якому відбувається змішування припливного та внутрішнього повітря, теплообмін з огорожувальними конструкціями та діють внутрішні джерела теплоти й вологи. Розглянуто систему давачів як багатоточкову мережу вимірювань у

робочій зоні й технологічній зоні, що забезпечує уніфікований цифровий опис стану мікроклімату.

Використані вимірювані параметри:

- температура повітря T , °C, у кількох контрольних точках робочої зони;
- відносна вологість φ , %, у тих самих точках;
- уміст CO_2 , ppm, як інтегральний індикатор інтенсивності повітрообміну та присутності персоналу;
- швидкість руху повітря u , м/с, у контрольних точках для оцінювання протягів та ефективності повітророзподілення;
- перепад тиску Δp_ϕ на фільтрах, Па, для оцінювання забруднення та корегування енергетичної моделі вентиляторів;
- температури припливного та витяжного повітря до й після теплоутилізатора для оцінювання ефективності повторного використання теплоти витяжного повітря.

Алгоритмічна структура системи керування передбачає:

- блок психрометричних перетворень, що за T і φ визначає парціальний тиск водяної пари p_v , Па, вологовміст ω і температуру точки роси T_{dp} , °C;
- блок оцінювання стану, який фільтрує вимірювання, виявляє аномалії та формує середні значення в робочій зоні;
- блок локального керування, який реалізує PID-контури для регулювання температури припливного повітря та керування зволоженням або осушенням;
- блок обмежень та безпеки, який контролює умови конденсації через порівняння точки роси з мінімальною температурою поверхонь;
- блок верхнього рівня оптимізування, який визначає оптимальні режими продуктивності вентиляторів, положення байпаса теплоутилізатора й режими підготовки повітря на горизонті прогнозування.

Для описування динаміки температури використано баланс енергії в припущенні ідеального перемішування:

$$\rho \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{\Delta T}{dt} = \rho \cdot C_p \cdot Q_n \cdot (T_n - T) + Q_{mex} - Q_{em}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт} \quad (1)$$

де ρ – густина повітря, кг/м³; C_p — питома теплоємність, Дж/(кг·К); L_n – витрата припливного повітря, м³/с; T_n – температура припливного повітря після підготовки, °C; Q_{mex} – внутрішні тепловиділення, Дж/с; Q_{em} — тепловтрати через огорожувальні конструкції та інфільтрацію, Дж/с.

Баланс вологи описано через безрозмірний вологовміст ω (кілограм

водяної пари на кілограм сухого повітря):

$$\rho \cdot C_p \cdot V \cdot \frac{\Delta T}{dt} = \rho \cdot C_p \cdot Q_n \cdot (T_n - T) + Q_{mex} - Q_{em}, \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт} \quad (2)$$

де ω_n – вологовміст припливного повітря; $W(t)$ – внутрішнє вологовиділення, кг/с.

Для верхнього рівня оптимізування сформульовано цільову функцію, що мінімізує сумарне відхилення температури та відносної вологості повітря від заданих значень і питомі енерговитрати:

$$\frac{\rho \cdot V \cdot d\omega}{dt} = \rho \cdot Q_n \cdot (\omega_n - \omega) + W(t), \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}, \quad (3)$$

де N – горизонт прогнозування; $P_{fan,k}$ – потужність вентиляторів, Дж/с; $P_{heat,k}$ і $P_{cool,k}$ – потужності нагріву та охолодження, Дж/с; $P_{lat,k}$ – приведені витрати на роботу осушення або зволоження (латентна складова), Дж/с; $a - f$ – вагові коефіцієнти.

Для порівняння застосовано три стратегії керування:

- правило-орієнтована стратегія з фіксованим повітрообміном і сезонним коригуванням температури припливного повітря;
- двоконтурне PID-керування температурою та відносною вологістю повітря;
- гібридна стратегія PID+MPC, де PID стабілізує швидкі процеси, а MPC визначає оптимальні режими на горизонті прогнозування.

Оцінювання виконувалося за показниками: середньоквадратичне відхилення температури та відносної вологості повітря в робочій зоні, тривалість виходу за допустимі межі, ризик конденсації (порушення умови за точкою роси) та приведені енерговитрати на підготовлення повітря.

Результати та обговорення. Запропонована автоматизована система керування тепловологісним режимом реалізується у вигляді тривірневої архітектури «давачі – керування – виконавчі механізми», доповненої диспетчеризацією. Рівень давачів забезпечує багатоточкове вимірювання параметрів мікроклімату з формуванням просторово-часового опису стану робочої зони. На рівні керування реалізуються локальні контури стабілізування та блок безпеки за точкою роси. Рівень оптимізування вирішує задачу енергоефективного розподілення ресурсів між вентиляцією, теплоутилізацією та режимами підготовлення припливного повітря.

Функціональна схема автоматизованого керування наведена як концептуальна модель (рис. 1)

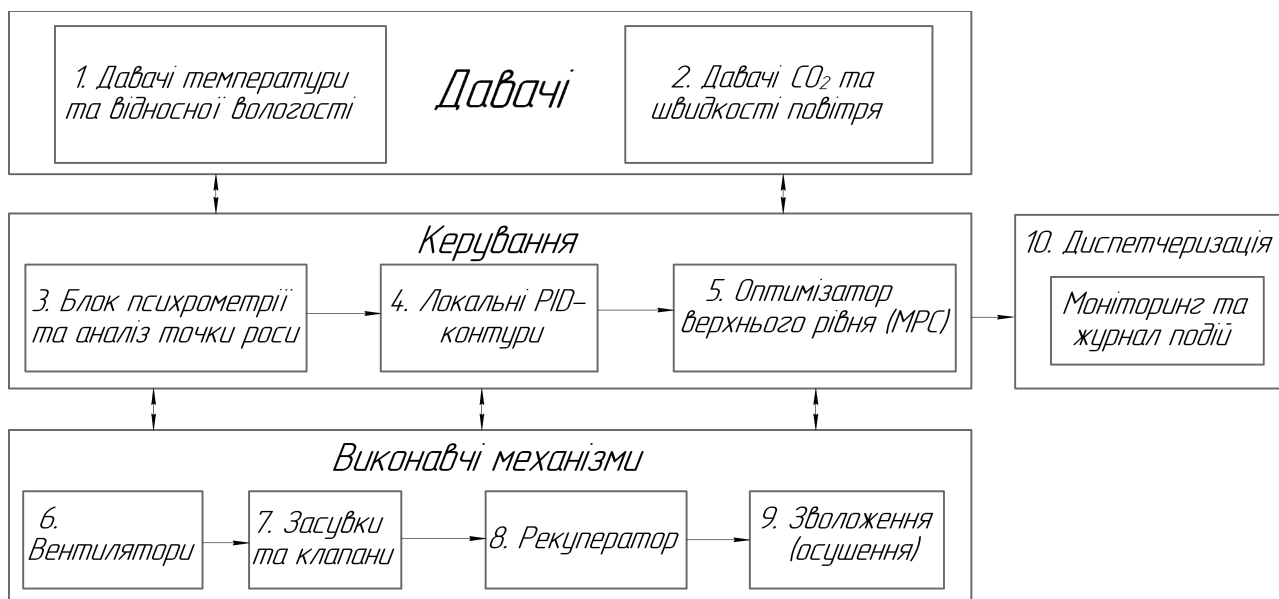


Рис. 1. Функціональна схема автоматизованого керування тепловологісним режимом: 1 – давачі температури та відносної вологості повітря в робочій зоні; 2 – давачі CO₂ та швидкості повітря; 3 – блок психрометрії та оцінювання точки роси; 4 – локальні PID-контури; 5 – оптимізатор верхнього рівня (адаптивний модуль, MPC); 6 – частотно-керовані вентилятори припливу і витяжки; 7 – повітряні заслінки та клапани; 8 – теплоутилізатор з керованим байпасом та/або швидкістю обертання ротора; 9 – модуль зволоження або осушення; 10 – панель диспетчеризації та журнал подій; розроблено авторами

Керований теплоутилізатор розглядається як активний елемент системи. У класичних схемах теплоутилізація працює постійно і зводиться до «пасивного» відбирання теплоти. У запропонованій концепції байпас рекуператора та режим його роботи визначаються алгоритмом керування залежно від енергетичної доцільності та психрометричних обмежень. У зимовий період теплоутилізація максимізується для підігрівання припливного повітря, у перехідні періоди можливе обмеження теплоутилізації, щоб уникати перегріву робочої зони, а в літній період теплоутилізатор може використовуватися для попереднього охолодження припливного потоку, якщо температура витяжного повітря нижча за температуру припливного і немає ризику підвищення відносної вологості.

Контролювання відносної вологості реалізовано через перехід від керування самої відносною вологості до управління вологовмістом і точкою роси. Психрометричні перетворення виконуються у два етапи. Парціальний тиск водяної пари визначається як:

$$p_v = \varphi \frac{p_{sat}(T)}{100}, \text{ Па}, \quad (4)$$

де $p_{sat}(T)$ – тиск насиченої пари, Па, при температурі T . Вологовміст:

$$\omega = \frac{0,622 \cdot p_v}{p - p_v}, \text{ Па}, \quad (5)$$

де p – атмосферний тиск. Температура точки роси T_{dp} визначається зворотним перетворенням через залежність $p_{sat}(t)$, Па.

Умова запобігання конденсації задається як:

$$T_{dp} \leq T_{s,min} - \Delta T_{zan}, \text{ Па}, \quad (6)$$

де $T_{s,min}$ – мінімальна температура поверхні огорожувальних конструкцій або елементів обладнання, на яких можливий конденсат, °С; ΔT_{zan} – температурний запас (1–3 °С) з урахуванням похибок давачів, неоднорідності поля температури та локальних «холодних містків». За порушення цієї умови система автоматично переходить у режим обмеження відносної вологості повітря або підвищення температури припливного потоку, а також формує повідомлення диспетчеру.

Для контролювання відносної вологості повітря запропоновано двоступеневу стратегію. На швидкому рівні локальний PID-контур коригує роботу зволоження або осушення за відхиленням φ від φ_{set} , але з коригуванням за температурою, щоб уникнути псевдоколивань відносної вологості. На повільному рівні оптимізатор працює із вологовмістом та обмеженням за температурою точки роси. Це дозволяє уникати ситуацій, коли підтримання відносної вологості повітря призводить до конденсації, або коли надмірне осушення викликає дискомфорт та небажані технологічні ефекти.

Для демонстрування впливу автоматизованого керування розглянуто модельний цех з параметрами: $V = 3000 \text{ м}^3$; внутрішні тепловиділення $Q_{mex} = 120 \dots 250 \text{ кВт}$ (зміна за режимом); вологовиділення $W = 0 \dots 0,030 \text{ кг/с}$ (імпульсні викиди під час мокрих операцій). Цільові значення для теплового періоду прийнято $T_{set} = 28 \text{ °С}$, $\varphi_{set} = 45 \%$, допустимі межі $T = 26 \dots 30 \text{ °С}$, $\varphi = 35 \dots 60 \%$. Змодельовано сценарій «технологічний імпульс» тривалістю 20 хв, у якому W зростає до 0,030 кг/с, а Q_{mex} збільшується на 60 кВт. Порівнювалися три стратегії керування (рис. 2–3).

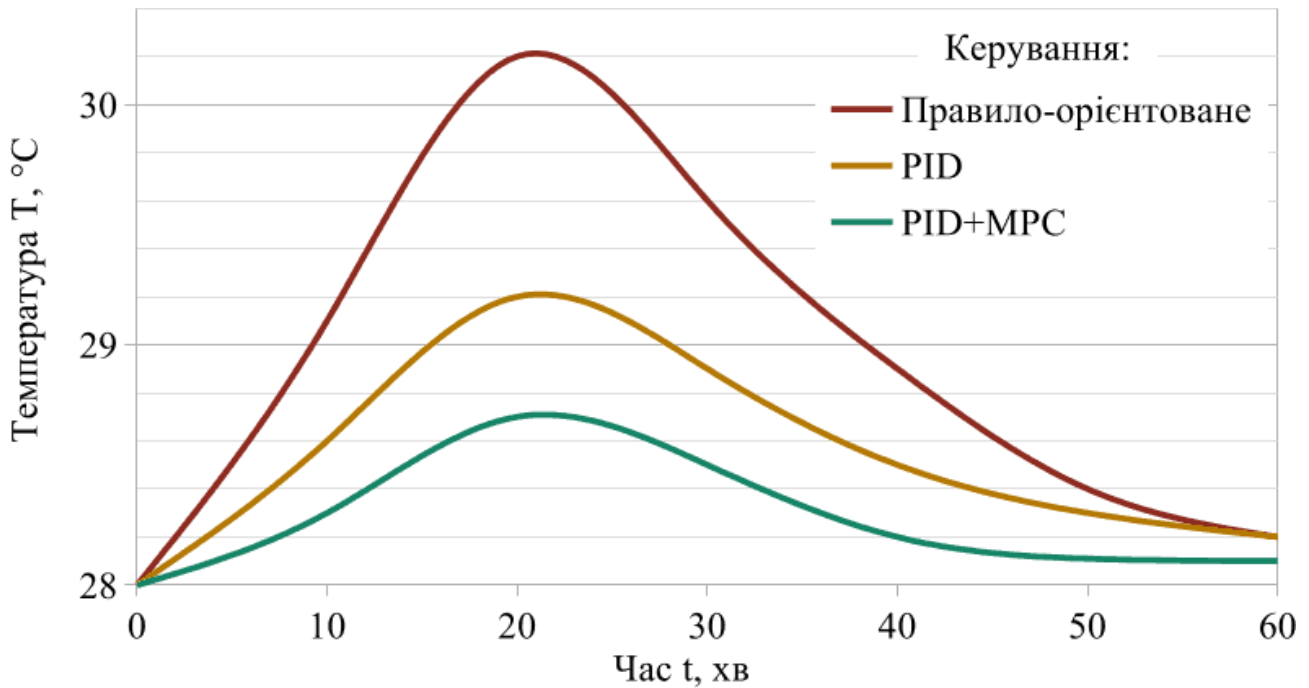


Рис. 2. Динаміка температури повітря у робочій зоні за різних стратегій керування. Джерело: авторські розрахунки

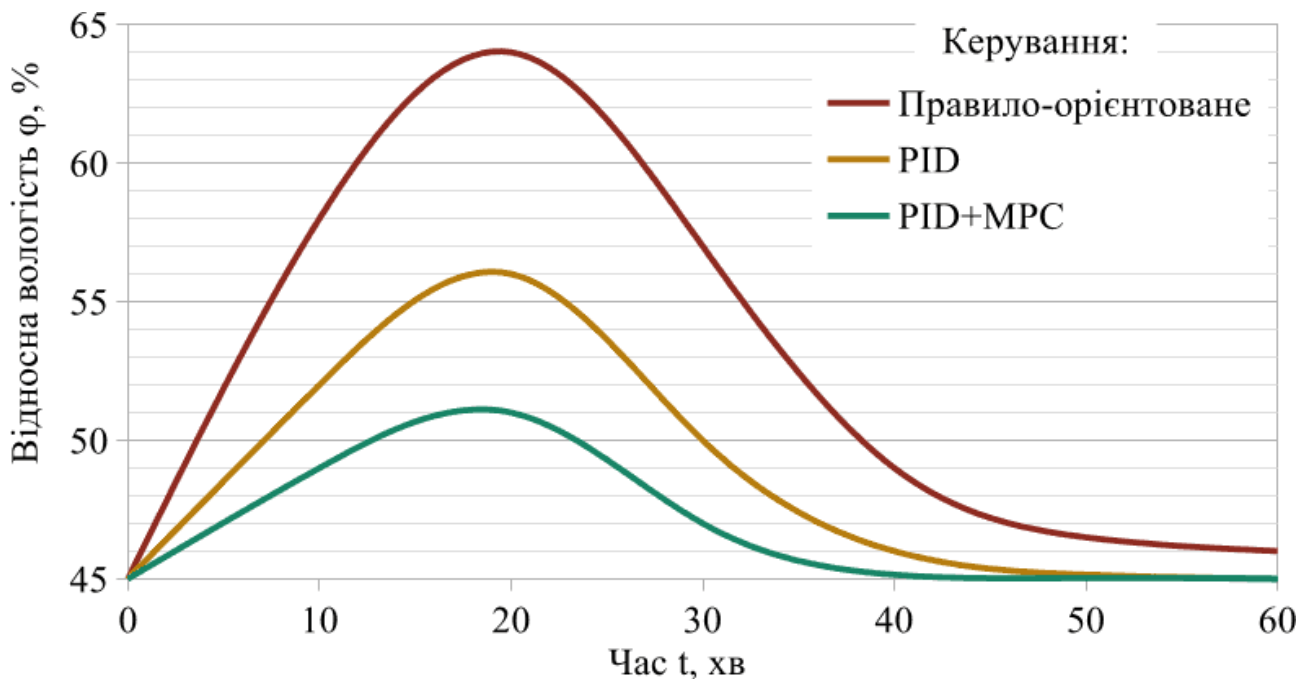


Рис. 3. Динаміка відносної вологості повітря у робочій зоні за різних стратегій керування. Джерело: авторські розрахунки

Дані показують, що за правило-орієнтованого керування система не встигає компенсувати імпульс вологи та теплоти, що призводить до виходу відносної вологості повітря за допустиму межу 60 % і підвищення температури до 30,2 °C. PID-керування покращує ситуацію, але через взаємний вплив контурів температури й відносної вологості та наявність запізнь спостерігається підвищена амплітуда відхилень. Гібридне керування PID+MPC

враховує прогноз на горизонт керування та «вартість» керівних дій, що зменшує пікові відхилення та прискорює повернення до заданих параметрів без надмірного осушення або переохолодження.

Енергетичний ефект оцінювався через приведені витрати енергії на підготовляння припливного повітря за 60 хв моделювання. Електроспоживання вентиляторів прийнято пропорційним кубу відносної швидкості, а витрати на нагрівання або охолодження (спрощено за явною теплотою) визначено за тепловим потоком:

$$P_{\text{тепл}} = \rho \cdot C_p \cdot L_n \cdot (T_n - T_{\text{зовн}}), \text{ Па}, \quad (7)$$

$$P_{\text{хол}} = \rho \cdot C_p \cdot L_n \cdot (T_{\text{зовн}} - T_n), \text{ Па}, \quad (8)$$

Результати демонструють зниження сумарних приведених енерговитрат приблизно на 12–20 % при переході від правило-орієнтованого керування до гібридного PID+MPC. Ефект досягається завдяки двом механізмам:

- зменшенню розрегулювання, яке призводить до переохолодження або надлишкового осушення
- керуванню продуктивністю вентиляторів за потребою, що зменшує витрати електроенергії на транспортування повітря.

Важливою складовою автоматизованої системи є діагностика стану вузлів. Забруднення фільтрів підвищує перепад тиску Δp_ϕ , Па, і електроспоживання вентиляторів. Тому контролювання Δp_ϕ використовується як сигнал для прогнозного обслуговування. Аналогічно ефективність теплоутилізації оцінюється температурним коефіцієнтом ефективності:

$$\eta_t = \frac{T_{n,\text{після}} - T_{n,\text{до}}}{T_{v,\text{до}} - T_{n,\text{до}}}, \quad (9)$$

де $T_{n,\text{після}}$ – температура припливного повітря після теплоутилізатора, °С; $T_{n,\text{до}}$ – температура припливного повітря до теплоутилізатора, °С; $T_{v,\text{до}}$ – температура витяжного повітря до теплоутилізатора, °С.

Зниження температурного коефіцієнта ефективності нижче порогового сигналізує про забруднення теплообмінної поверхні або зміну режиму потоку.

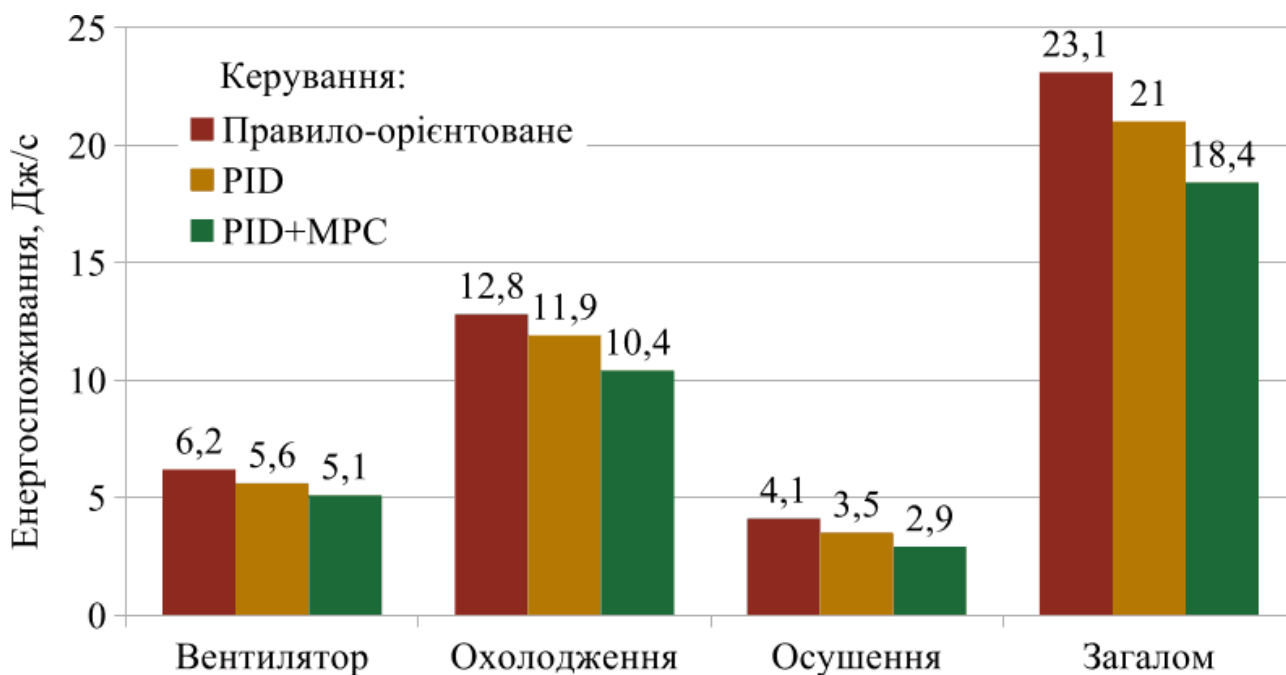


Рис. 4. Порівняння приведених енерговитрат за різних стратегій керування: Енергія осушення подана у приведених одиницях для порівняння стратегій; абсолютні значення залежать від типу осушувача та джерела енергії, розроблено авторами на основі власних розрахунків.

Для підвищення стійкості у промислових умовах доцільним є резервування вимірювань і застосування «віртуальних давачів» на основі моделей (1)–(2). При відмові окремого давача система може тимчасово використовувати оцінені значення і переходити у безпечний режим із консервативними обмеженнями, що забезпечує деградацію без різких змін керування.

Запропонована система може бути впроваджена як надбудова над наявними вентиляційними агрегатами шляхом встановлення частотних перетворювачів, давачів і контролера верхнього рівня. Наявні повітрянагрівачі, охолоджувачі, теплоутилізатори та заслінки використовуються як виконавчі органи. Для сумісності доцільно використовувати стандартизовані протоколи обміну даними, а для промислової експлуатації – забезпечувати журналювання подій, контролювання доступу та захист каналів зв'язку.

Таким чином, автоматизоване керування тепловологісним режимом на основі сенсорної мережі та керованої рекуперації дозволяє одночасно підвищити стабільність параметрів мікроклімату і зменшити енерговитрати на підготовлення повітря. Перспективним напрямом подальшого розвитку є зональне керування (розбиття приміщення на зони з окремими контурами) та використання прогнозів технологічного графіка та погодних параметрів для більш точного прогнозного керування.

Висновки та пропозиції. Запропонована інженерна концепція автоматизованого керування тепловологісним режимом промислових приміщень поєднує мережу давачів для багатоточкових вимірювань, психрометричні перетворення, керувану теплоутилізацію та гібридний підхід до керування, у якому локальні PID-контури доповнюються верхнім рівнем оптимізування з прогнозуванням. Задля запобігання конденсації, зменшення корозійної небезпеки та стабілізування технологічних умов доцільно відмовитися від керування лише за температурою або відносною вологістю повітря на користь комплексного керування температурою, вологовмістом і точкою роси. Керована теплоутилізація є активним елементом системи. Модельне порівняння трьох стратегій керування за сценарію імпульсних технологічних збурень показало, що гібридне керування забезпечує менші відхилення температури й відносної вологості, скорочує тривалість виходу за допустимі межі та зменшує приведені енерговитрати на підготовлення припливного повітря. Для практичного впровадження рекомендовано поєднувати автоматизоване керування з діагностикою стану фільтрів та теплоутилізатора, резервуванням вимірювань та реалізацією безпечних режимів деградації при відмовах сенсорів.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження доцільно спрямувати на зональне керування з урахуванням просторової неоднорідності поля температури й вологості, а також на використання прогнозів виробничого графіка для підвищення ефективності прогнозного керування.

References

1. Benito, P. I., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C. “Study and Application of Industrial Thermal Comfort Parameters by Using Bayesian Inference Techniques.” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 24, 2021, p. 11979. <https://doi.org/10.3390/app112411979>.
2. Корбут, В., Ткаченко, Т., Мілейковський, В., Морковник, С., & Клименко, Г. “Моделювання організації витісняючої вентиляції з забезпеченням теплового й шумового комфорту.” *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*, no. 55, 2025, pp. 6–32. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2025.55.6-32>.
3. Bueno, A. M., de Paula Xavier, A. A., & Broday, E. E. “Evaluating the Connection between Thermal Comfort and Productivity in Buildings: A Systematic Literature Review.” *Buildings*, vol. 11, no. 6, 2021, p. 244. <https://doi.org/10.3390/buildings11060244>.

4. Cotrino, A., Sebastián, M. A., & González-Gaya, C. “Industry 4.0 Roadmap: Implementation for Small and Medium-Sized Enterprises.” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 23, 2020, p. 8566. <https://doi.org/10.3390/app10238566>.
5. Afram, Abdul, and Farrokh Janabi-Sharifi. “Theory and Applications of HVAC Control Systems – A Review of Model Predictive Control (MPC).” *Building and Environment*, vol. 72, 2014, pp. 343–355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.11.016>.
6. Oldewurtel, F., Parisio, A., Jones, C. N., Gyalistras, D., Gwerder, M., Stauch, V., Lehmann, B., & Morari, M. “Use of Model Predictive Control and Weather Forecasts for Energy Efficient Building Climate Control.” *Energy and Buildings*, vol. 45, 2012, pp. 15–27. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.022>.
7. Dawood, S. M., Hatami, A. and Homod, R. Z. “HVAC System Modeling and Control Methods: A Review and Case Study.” *Journal of Energy Management and Technology*, vol. 6, no. 4, 2022, pp. 217–231. <https://doi.org/10.22109/jemt.2022.298902.1324>.
8. Homod, R. Z. “Analysis and Optimization of HVAC Control Systems Based on Energy and Performance Considerations for Smart Buildings.” *Renewable Energy*, vol. 126, 2018, pp. 49–64. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.022>.
9. Sabirov, I. F. N. D., and A. K. Oqilov. “Technology in Microclimate Control for Industrial Buildings: Enhancing Efficiency and Comfort.” *Texas Journal of Engineering and Technology*, vol. 21, 2023, pp. 33–36.
10. Rînjea, C., Chivu, O. R., Darabont, D.-C., Feier, A. I., Borda, C., Gheorghe, M., & Nitoi, D. F. “Influence of the Thermal Environment on Occupational Health and Safety in Automotive Industry: A Case Study.” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 14, 2022, p. 8572. <https://doi.org/10.3390/ijerph19148572>.
11. Somanathan, E., & Somanathan, Rohini & Sudarshan, Anant & Tewari, Meenu. “The Impact of Temperature on Productivity and Labor Supply: Evidence from Indian Manufacturing.” *Journal of Political Economy*, vol. 129, 2021. <https://doi.org/10.1086/713733>.
12. Tian, Y., Gao, Y., Tang, X., Hua, L., Li, S., & Wang, Y. *Temperature and Humidity Cascade Control Method Based on AHU Return Air Unit*. China Patent No. CN113110651B, China National Intellectual Property Administration, 2022. <https://patents.google.com/patent/CN113110651B/en>.
13. Bolibrukh, B., Glyva, V., Kasatkina, N., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O. et al. “Monitoring and Management of Ion Concentrations in the Air of Industrial and Public Premises.” *Eastern-European Journal of Enterprise*

- Technologies*, vol. 1, no. 10 (115), 2022, pp. 24–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>.
14. Bezrodny, M., and T. Misiura. “Heat Pump System for Air Heating and Ventilation of an Industrial Building with Excessive Moisture.” *KPI Science News*, no. 2, 2020, pp. 7–16. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2020.2.205111>.
 15. Gorai, V., Singh, S., & Jani, D. B. “A Comprehensive Review on Solid Desiccant-Assisted Novel Dehumidification and Its Advanced Regeneration Methods.” *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 149, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13479-9>.
 16. Su, X., Geng, Y., Huang, L., Li, S., Wang, Q., Xu, Z., & Tian, S. “Review on Dehumidification Technology in Low and Extremely Low Humidity Industrial Environments.” *Energy*, vol. 302, 2024, p. 131793. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131793>.
 17. Salins, S. S., Reddy, S. V. K., & Kumar, S. “Performance Assessment of Sustainable Energy Based Novel Technique for Multistage Reciprocating Liquid Dehumidification System.” *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 179, 2022, p. 107660. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2022.107660>.
 18. DSN 3.3.6.042-99. *State Sanitary Standards for the Microclimate of Industrial Premises*. Ministry of Health of Ukraine, 1999, <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/va042282-99#Text>.
 19. DBN V.2.5-67:2013. *Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine, 2013.
 20. DSTU EN 16798-1:2022. *Energy Performance of Buildings – Ventilation for Buildings – Part 1: Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics (EN 16798-1:2019, IDT)*. 2022.
 21. DSTU B EN ISO 7730:2011. *Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort Based on Calculations of PMV and PPD Indices and Local Thermal Comfort Criteria (EN ISO 7730:2005, IDT)*. 2011.
 22. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. *ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. 2023. <https://climateinsight.ca/csg/ashrae-55-2023-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>.

UDC 697.94:681.5:004.7

Dr Hab., Prof. **Nataliia Shvager**,
shwager.n@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9986-8605,
PhD, Assoc. Prof. **Mykola Khudyk**,
khudyk.mykola@knu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1155-2535,
Kyryvyi Rih National University

<https://doi.org/10.32347/2409-2606.2026.57.75-91>

AUTOMATED CONTROL OF THE THERMAL AND MOISTURE CONDITIONS IN INDUSTRIAL PREMISES BASED ON A SENSOR NETWORK AND ADAPTIVE HEAT RECOVERY

Abstract. *Industrial premises with intensive heat emissions and unstable moisture loads, including drying, mineral processing, metallurgical, glass-making and food production workshops, are characterised by significant variability of air environment parameters throughout the working shift. Variations in thermal and moisture loads are determined by the specific features of technological processes, operating modes of equipment, as well as the influence of external climatic conditions. Under such circumstances, conventional ventilation and air-conditioning systems operating in fixed modes and failing to account for the inertia of the facility and the interrelation between temperature and humidity often do not ensure a stable indoor microclimate and lead to increased energy consumption, control overshoot and unstable dehumidification or humidification regimes. The aim of this study is to develop an engineering concept for automated control of the thermal and humidity regime that integrates multi-point sensor monitoring of microclimate parameters, a transition from relative humidity to humidity ratio and dew-point temperature, controlled heat recovery, and a hybrid control strategy in which local proportional–integral–derivative control loops are complemented by an upper-level optimisation layer with forecasting capability. Approaches to demand-controlled operation, predictive control and integrated humidity management are generalised. A three-level architecture is proposed, comprising measurements of temperature, relative humidity, CO₂ concentration, air velocity and filter pressure drop, local stabilisation with a dew-point safety module, and optimisation of fan performance, heat recovery bypass position, and humidification or dehumidification modes. It is demonstrated that controlled heat recovery serves not only as an energy-saving measure but also as a controllable tool for stabilising supply air parameters. A model-based comparison of three control strategies confirmed that the hybrid approach reduces temperature and humidity deviations, shortens the duration of excursions beyond permissible limits, and lowers the integral energy consumption required for supply air treatment.*

Keywords: *automation; indoor microclimate; relative humidity; heat transfer; heat recovery; sensor network; ventilation control; dew-point temperature; energy efficiency.*

Received/Надійшла до редакції 05.03.2026

Accepted/Прийнято 06.05.2026

Issued/Опубліковано 29.05.2026

 Distributed under the license / Розповсюджується за ліцензією:

Creative Commons Attribution 4.0 International License