

Штіфзон О.Й.

<https://orcid.org/0000-0003-0011-4617>

Національний технічний університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Юдін О.С.

<https://orcid.org/0009-0007-6016-5631>

Національний технічний університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СКЛАДСЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ ДЕРЕВООБРОБНОГО ПІДПРИЄМСТВА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У статті розглянуто систему регулювання параметрів мікроклімату складського приміщення деревообробного підприємства з застосуванням нечіткої логіки. Було визначено вимоги до приміщень складського типу на основі вимог до зберігання готової продукції. Об'єктом управління була установка припливно-витяжної вентиляція з секцією підтримання параметрів мікроклімату (нагрів, охолодження, зволоження). Розглянута проблематика та вимоги регулювання параметрів мікроклімату, зокрема температури, в умовах нестаціонарності та за наявності додаткових зовнішніх збурень. Проаналізовано структури систем автоматичного регулювання які традиційно використовують для вирішення подібних проблем. Показано практичну неможливість побудови системи з урахуванням всіх факторів впливу в межах традиційного підходу для проектування подібних систем. Запропоновано рішення, що дозволяє врахувати зовнішні збурення та взаємозв'язок параметрів мікроклімату на основі алгоритмів нечіткої логіки. На етапі синтезу нечіткої системи регулювання було повноцінно оглянуто функціональну схему автоматизації системою припливно-витяжної вентиляції. Проведено моделювання роботи системи з нечітким регулятором в умовах одночасної дії кількох зовнішніх збурень. Розраховано налаштування регулятора традиційної системи автоматичного регулювання з пропорційно-інтегральним (PI) регулятором методом розширених амплітудно-фазових характеристик. Порівняно роботу системи з нечітким регулятором з традиційною системою регулювання на основі PI-регулятора. На основі моделювання, показано переваги системи з нечітким регулятором над системою з PI – регулятором, як з точки зору якості регулювання, так і з точки зору гнучкості роботи. Доведено працездатність системи з нечітким регулятором в умовах комбінованого впливу зовнішніх збурень. Запропоновано простий та зручний спосіб налаштування системи з нечітким регулятором з мінімальним набором правил.

Ключові слова: нечітка логіка, функція приналежності, зовнішні збурення, моделювання, показники якості.

Постановка проблеми. Системи вентиляції та мікроклімату відіграють ключову роль на будь-якому підприємстві незалежно від сфери його діяльності. У деревообробній промисловості дані системи використовуються не лише для забезпечення здорових умов праці для персоналу, а і для збереження самого продукту після обробки та, навіть, вихідної сировини. Оскільки в даній галузі переважають багатосекційні приміщення, які поєднані між собою для безпечного та ефективного транспортування матеріалів між вироб-

ничими та обробними установками, регулювання параметрів повітря та мікроклімату цих приміщень стає досить складною задачею. Зазвичай, кількість персоналу в таких приміщеннях є обмеженою, тому пріоритетом в першу чергу є підтримання параметрів мікроклімату відповідно до вимог та технології зберігання продукції. Непостійні температури та вологість напряму впливають на фізичні параметри деревини та можуть не тільки ускладнити процеси обробки та сортування пиломатеріалів, а і зіпсувати цілі партії фінальної



продукції. В свою чергу, перевищення швидкості повітря може призвести до появи дефектів на деревині внаслідок пересушення верхніх шарів, появи градієнтів вологості та напружень.

Системи вентиляції складських приміщень поділяються на кілька основних типів, залежно від завдання та принципів функціонування:

- Припливні системи – системи, що забезпечують приміщення свіжим повітрям та допомагають підтримувати параметри мікроклімату. Мають фільтри для очищення припливного повітря та, зазвичай, секції нагріву. Вони використовуються для малих приміщень з невисокими вимогами до регулювання, тому і не мають додаткових секцій (охолодження, зволоження). Схема подібної системи наведена на рисунку 1.

- Витяжні системи – системи, що в першу чергу усувають забруднення та виключають можливість різкого підвищення вологості завдяки видаленню нагрітого та забрудненого повітря. Якщо система працює окремо (без припливної частини), то припливне повітря надходить ззовні, або з суміжних приміщень. Такі системи

не потребують додаткових секцій регулювання. Схема подібної системи наведена на рисунку 2.

- Припливно-витяжні системи – системи, що поєднують функціонали припливних та витяжних. Вимоги та складність таких систем є найвищими, оскільки в них вже використовуються секції зволоження, охолодження, нагріву та автоматично регулюється швидкість повітрообміну. Додатково в таких системах можуть використовуватись рециркуляція (за умови низького забруднення) та рекуперація для підвищення енергоефективності. Приклад подібної системи наведено на рисунку 3.

Основними вимогами до таких систем є :

1. Ефективний повітрообмін;
2. Виключення імовірності появи конденсатів;
3. Підтримка оптимальних температурних режимів;
4. Очистка повітря;
5. Енергоефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Зазвичай для регулювання контрольних параметрів мікроклімату використовують одноконтурні, або каскадні системи регулювання. Вибір зале-

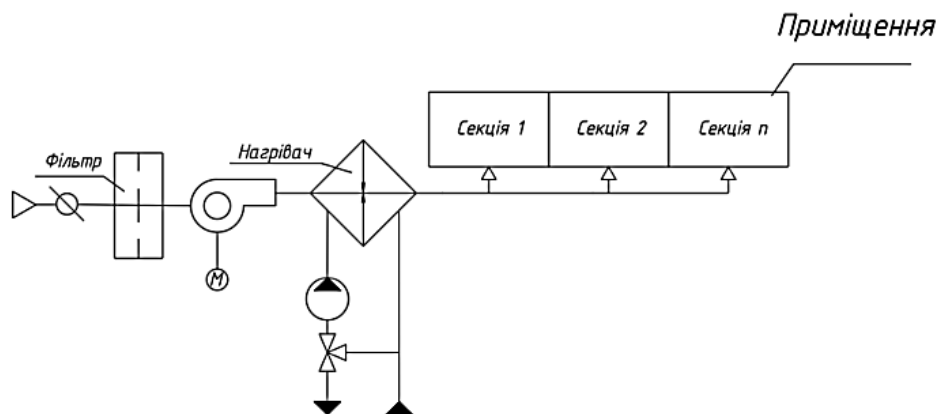


Рис. 1. Схема припливної системи

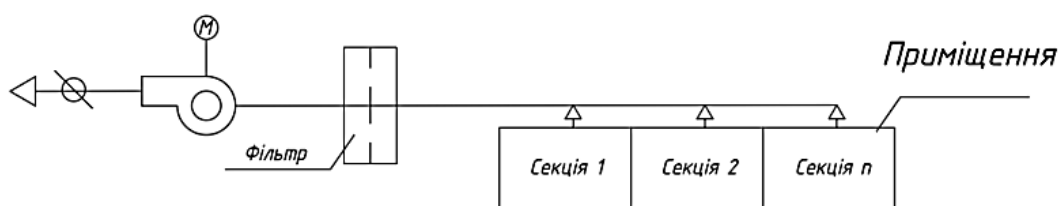


Рис. 2. Схема витяжної системи

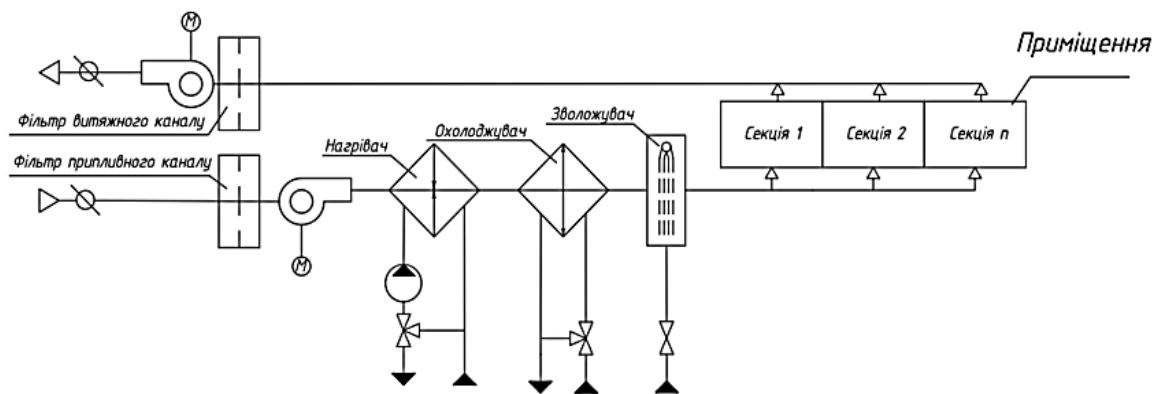


Рис. 3. Схема припливно-витяжної системи

жить від площі (об'єму) приміщення та вимог до точності регулювання. Проте класичні системи мають одну спільну проблему – дрейф параметрів. Це явище, за якого поступово змінюються параметри об'єкта управління під дією постійних зовнішніх факторів: відбувається рух об'єкта в просторі станів [1]. Наприклад, до дрейфу призводить зміна параметрів повітря (погодна, чи через зміну сезону), при цьому, додатково, можуть змінюватись характеристики самого приміщення. Додаткова складність полягає ще і в тому, що оптимальні параметри повинні досягатись при обмеженні швидкості руху повітря, оскільки її збільшення може призвести до пересушення пиломатеріалів (навіть після етапу сушки) і спричинити дефекти на деревині, псуючи готову продукцію.

Враховуючи все вищевикладене, нелінійність, нестационарність та розподіленість параметрів, постає питання застосування альтернативних методів регулювання, одним з яких і є нечітка логіка [2]. Саме використання нечіткого регулятора, який не потребує для свого налаштування точної інформації про математичну модель об'єкту керування (яку в зазначених випадках майже неможливо отримати) є найбільш перспективним способом побудови систем автоматичного регулювання для подібних об'єктів.

Проте, слід зазначити, що використання нечітких регуляторів має свої обмеження. Наприклад, розробка бази правил може бути трудомістким процесом, особливо для складних систем, а ефективність системи сильно залежить від точності, якості та повноти бази правил.

Загалом, поточний стан деревообробної галузі знаходиться на досить низькому рівні і причина цього полягає не лише у відсутності автоматиза-

ції процесів обробки та сортування, відсутності інноваційних рішень та підходів до рішення задач галузі в країні чи, навіть, війни, а і тому, що більшість сировини після мінімальної обробки одразу іде на експорт, а запасання деревиною на підприємствах не є пріоритетом (Україна до війни посідала 27 місце за обсягами експорту деревини та продукції з неї [3]). При цьому фактична лісистість України (16,72%) не відповідає оптимальній (20%) [4], що означає, що відсоток територій, що вкриті лісом для забезпечення максимальної екологічної, ґрунтової та кліматичної стабільності, а також для забезпечення лісових ресурсів, не досягається. Проблемою також є і падіння якості деревини, що спричинене приростом попиту та переорієнтацією на продуктивність, а не на якість, що породжує труднощі для подальших циклів обробки, підвищує пріоритет запасання та зберігання деревини та пиломатеріалів.

Постановка завдання. Метою цієї роботи є створення системи регулювання параметрів мікроклімату з урахуванням взаємовпливу параметрів та зовнішніх збурень на основі алгоритмів нечіткої логіки. Для цього пропонується виконати моделювання роботи такої системи і порівняти її з традиційною системою регулювання з використанням пропорційно-інтегрального (PI) регулятора. Результатом такого порівняння стане обґрунтування доцільності використання систем з нечіткою логікою для автоматизації регулювання параметрів мікроклімату в складських приміщеннях деревообробних підприємств з урахуванням їх багатосекційної структури та особливостей зберігання продукції.

Виклад основного матеріалу. Об'єкт управління являє собою багатосекційне складське приміщення. Для врахування впливу суміжних

приміщень будемо розглядати температуру повітря навколишнього середовища та температури суміжних приміщень або ж стінки заданого приміщення, як зовнішні збуренні. Зауважимо, що на відміну від впливу зовнішньої температури, існує можливість отримання функціональної залежності (математичної моделі у вигляді передавальної функції) для температура стінки. Також, варто відзначити наявний вплив вологості на температуру повітря і навпаки. Для систем регулювання параметрів мікроклімату варто розглядати саме відносну вологість – міру здатності повітря утримувати воду.

В ході дослідження літературних джерел [5] було знайдено підхід із апроксимацією моделі подібного об'єкта управління передавальною ланкою першого порядку з транспортним запізненням, формула (1):

$$\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (1)$$

де

T – стала часу об'єкту;

τ – транспортна затримка;

K – коефіцієнт передачі об'єкта.

В ході дослідження системи було припущено, що умови навколишнього середовища є наступними:

- Надходження теплової енергії: $w = 1,248 \text{ ккал/хв} \cdot \text{°C}$
- Температура повітря, що надходить: $\theta_s = 10 \text{ °C}$
- Абсолютна вологість повітря, що надходить: $x_s = 0,008 \text{ кг/кг сухого повітря}$
- Температура зовнішнього повітря: $\theta_o = 32,5 \text{ °C}$
- Абсолютна вологість зовнішнього повітря: $x_o = 0,0195 \text{ кг/кг сухого повітря}$

Початкові умови взяті при $t = 0$ для $i = 1, 2, \dots, 5$:

- $\theta_i(0) = \theta_{wi}(0) = \theta_o$;
- $x_i(0) = x_o$

В результаті моделювання було отримано перехідні характеристики для температур повітря, стінки та відносної вологості для кожної з досліджуваних секцій приміщення, які наведено на рисунках 4, 5, 6.

З рисунку 4 можна побачити, що температури 1 та 2 швидко виходять на стаціонарне значення, проте для зон 3, 4 та 5 цей процес триває довше через більші теплові ємності та взаємодію з підлогою, стінами і системою охолодження. З рисунку 5 видно, що процеси є досить аперіодичними через високі теплові ємності. В свою чергу на рисунку 6 видно різке зростання вологості для зон 1 та 2,

що пов'язано зі швидким охолодженням припливного повітря. У цей же час вологість для зон 3, 4 та 5 швидко знижується через наявне теплове навантаження та повільно зростає після зниження температури стін.

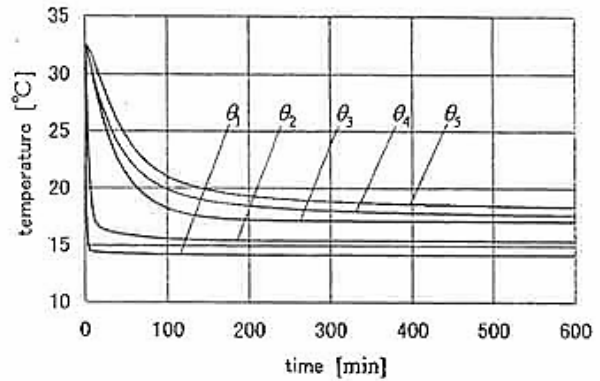


Рис. 4. Перехідні характеристики для температури повітря в приміщенні для кожної з досліджуваних секцій

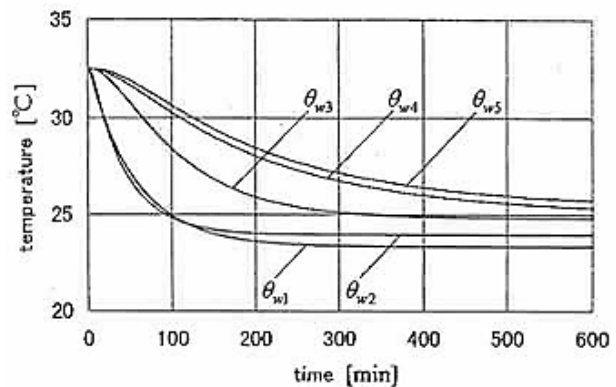


Рис. 5. Перехідні характеристики для температур стінки для кожної з досліджуваних секцій

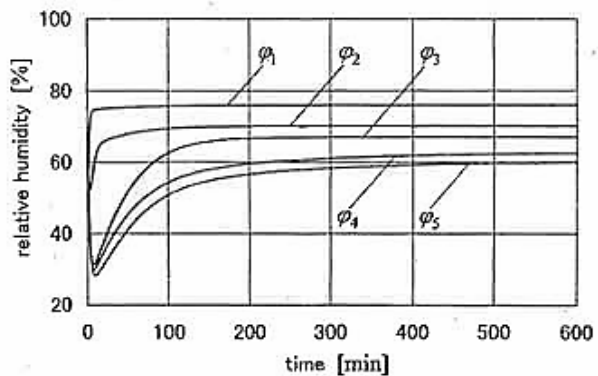


Рис. 6. Перехідні характеристики для відносної вологості для кожної з досліджуваних секцій

Передавальна функція по температурі повітря безпосередньо в приміщенні, описується формулою (2):

$$W(s)_{\text{вн.}} = \frac{2.5e^{-2.2s}}{1+37s} = \frac{2.5e^{-132s}}{1+2220s} \quad (2)$$

Передавальна функція по температурі поділяючої стінки між секціями приміщень описується формулою (3):

$$W(s)_{\text{ст.}} = \frac{1.544e^{-0.14s}}{1+2.5s} = \frac{1.544e^{-8.4s}}{1+150s} \quad (3)$$

Передавальна функція по відносній вологості в приміщенні описується формулою (4):

$$W(s)_{\text{вол.}} = \frac{0.66e^{-2.2s}}{1+2.9s} = \frac{0.66e^{-132s}}{1+174s} \quad (4)$$

У формулах (2,3,4) в першому випадку стали часу та запізнення задані в хвилинах [6] і перераховані в секунди у другому випадку.

На рисунку 7 наведено схему автоматизації функціональну для припливно-витяжної вентиляційної установки. Розгляд її необхідний для розуміння всіх збурень та керуючих дій наявних в системі, для подальшого врахування при синтезі системи регулювання. Основними її компонентами є:

- Фільтруючі установки, що встановлені у припливному та витяжному каналах
- Два вентилятори - по одному на канал для управління якими використовуються частотні перетворювачі
- Секція нагріву повітря (водяний калорифер)
- Секція охолодження повітря (водяний охолоджувач)
- Секція зволоження повітря SKV з локальною автоматикою
- Вентиляційні заслінки
- Давачі температури з уніфікованим вихідним сигналом
- Давач вологості з діапазоном вимірювання 0-100%.
- Давач якості повітря для вимірювання концентрації різних шкідливих часток та газів, таких як вуглекислий газ, формальдегід, пил та інші.

Спочатку було синтезовано традиційну систему регулювання з ПІ-регулятором з врахуванням зовнішнього збурення у вигляді температури поділяючої стінки та взаємного впливу вологості повітря та температури. Така схема представлена на рис 8. Розрахунок налаштувань регулятора

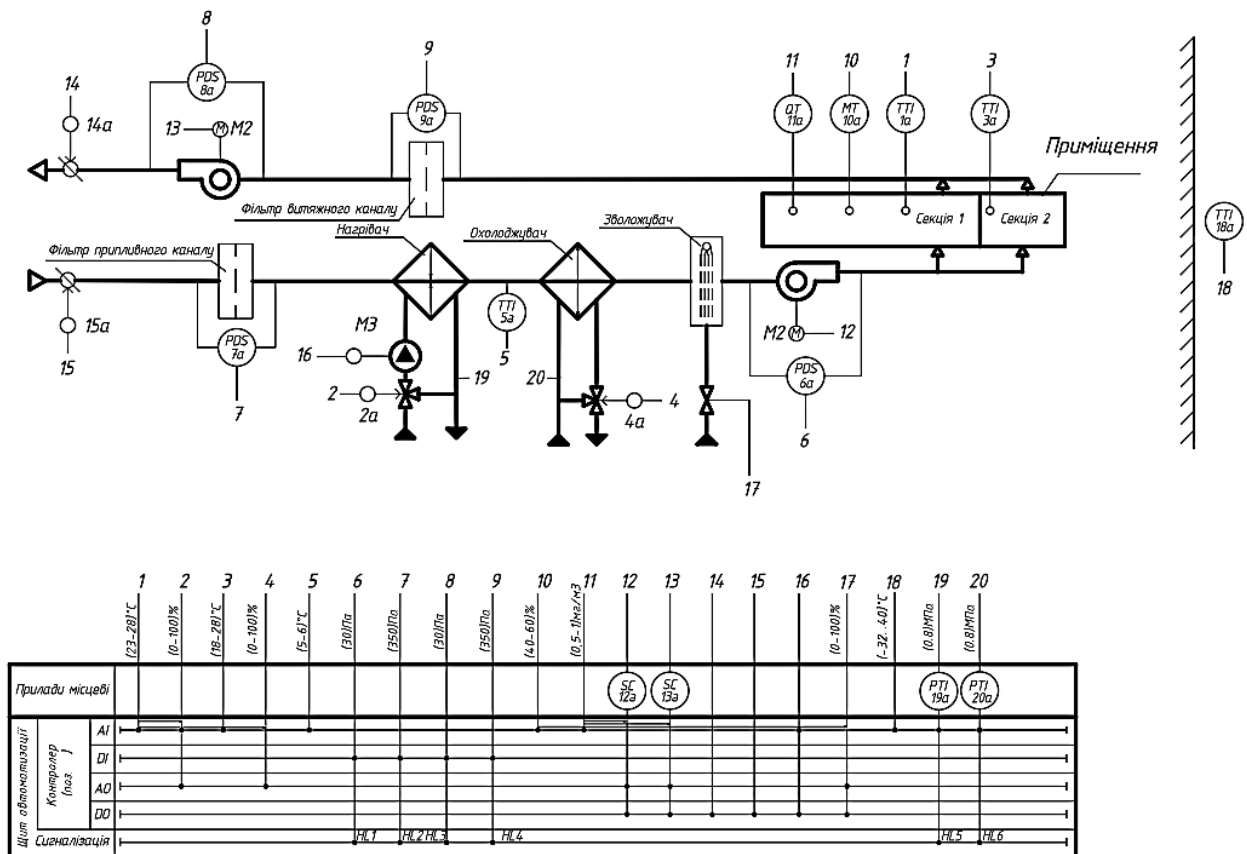


Рис. 7. Схема автоматизації функціональна

виконано методом розширених амплітудно-фазових характеристик (РАФХ) на степінь коливальної стійкості 0.3665 (відповідає коефіцієнту затування 0.9). Отримані в результаті моделювання перехідні процеси представлено на рисунку 9.

Була розглянута можливість застосування схеми з адаптуючим пристроєм на базі нечіткого регулятора [7]. Проте, це давало можливість врахувати лише зовнішні збурення по температурі, залишаючи поза увагою взаємовплив температури і вологості. Отже,

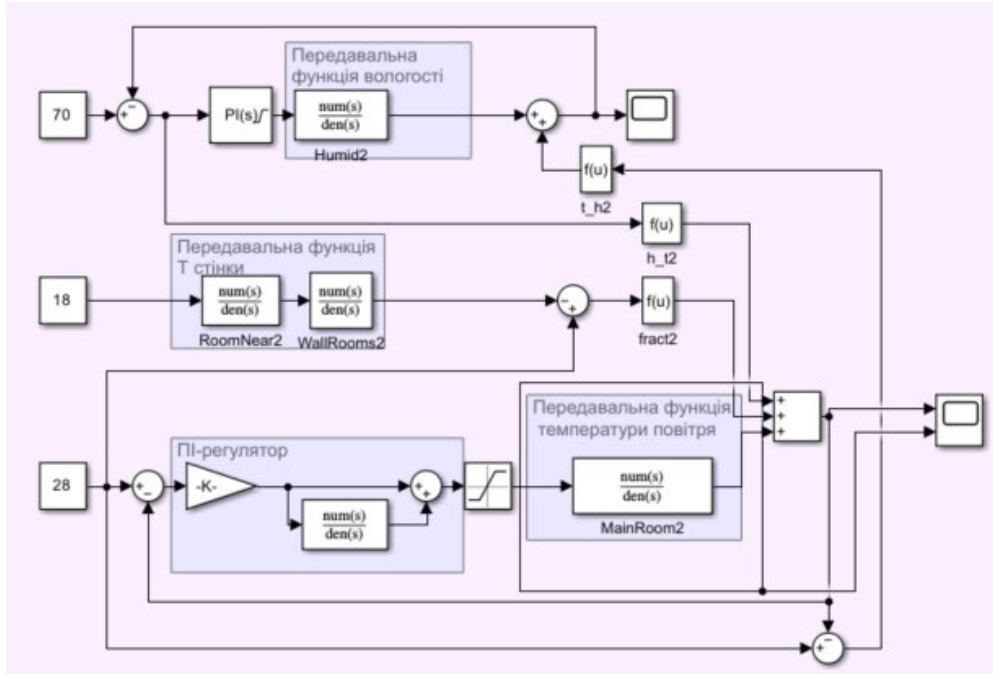


Рис. 8. Схема системи регулювання з ПІ-регулятором

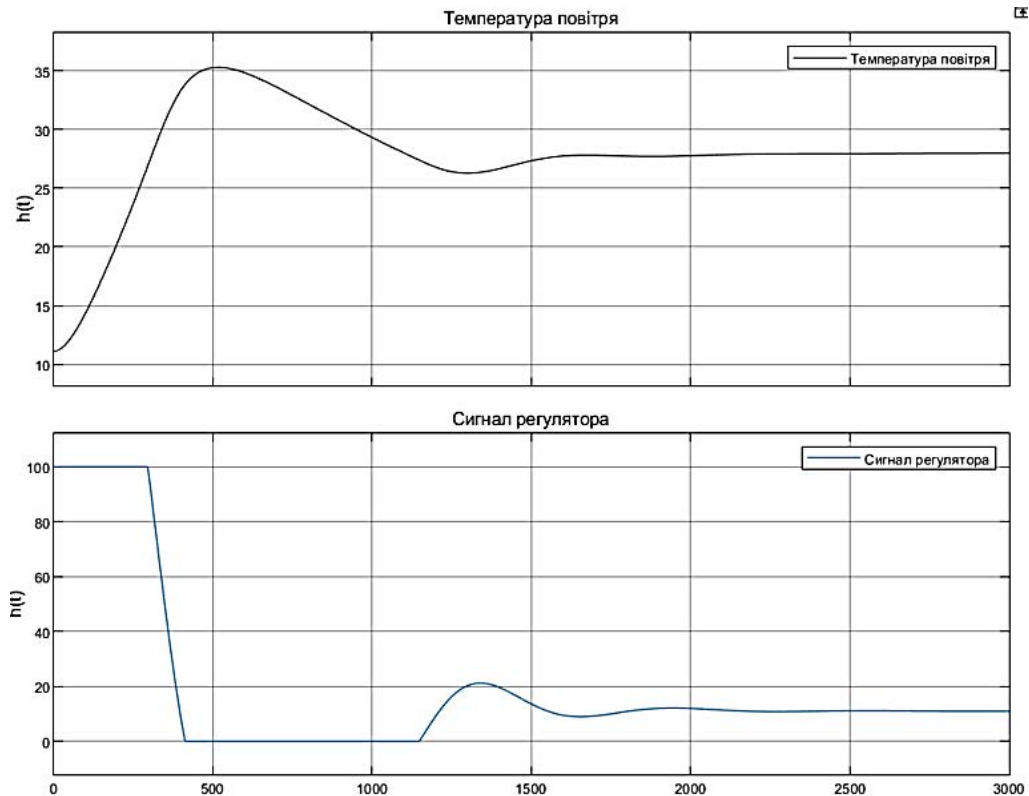


Рис. 9. Графіки перехідних процесів в системі з ПІ-регулятором

для застосування нечіткого регулятора було розроблена нова структура з трьома входами, кожен з яких має три функції приналежності, та одним виходом з чотирма функціями приналежності, показана на рисунку 10. Повна база правил містить 27 правил (максимальна можлива кількість для випадку 3 входів з 3 функціями приналежності кожний)

Схема системи регулювання з нечітким регулятором і врахуванням додаткових сигналів представлена на рисунку 11.

Отримані перехідні процеси для основного параметра – температури в приміщенні, температури стінки, відносної вологості та виходу регулятора, наведені на рисунку 12.

Слід зауважити, що для моделювання був обраний режим виходу на номінальне значення з нульових початкових умов. Такий спосіб було обрано для більшої наочності різниці в роботах зазначених систем.

Показники якості регулювання для обох систем зведено в таблицю 1. Таким чином, система

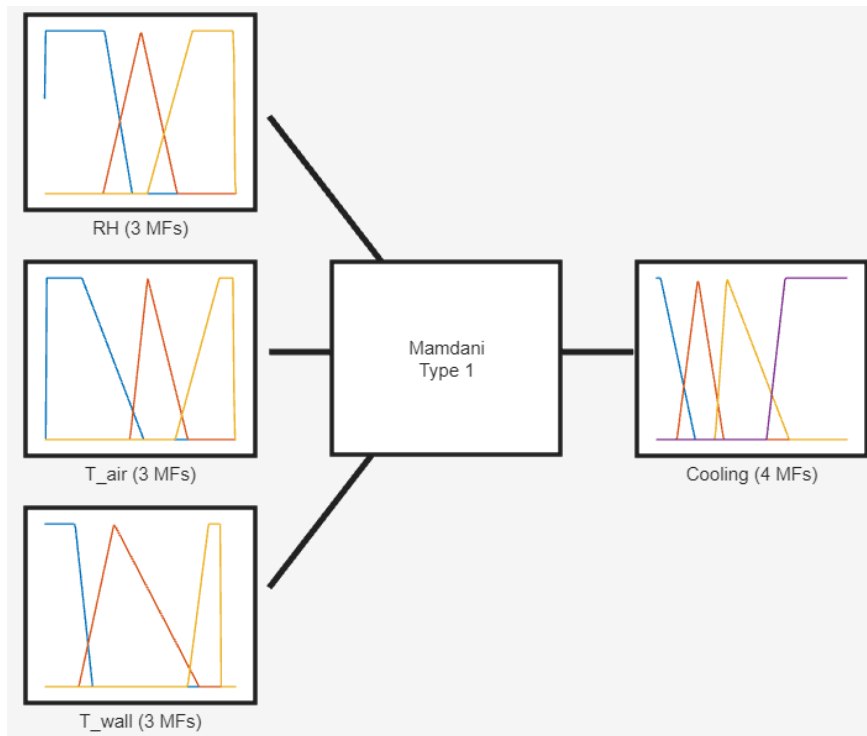


Рис. 10. Структурна схема нечіткого регулятора

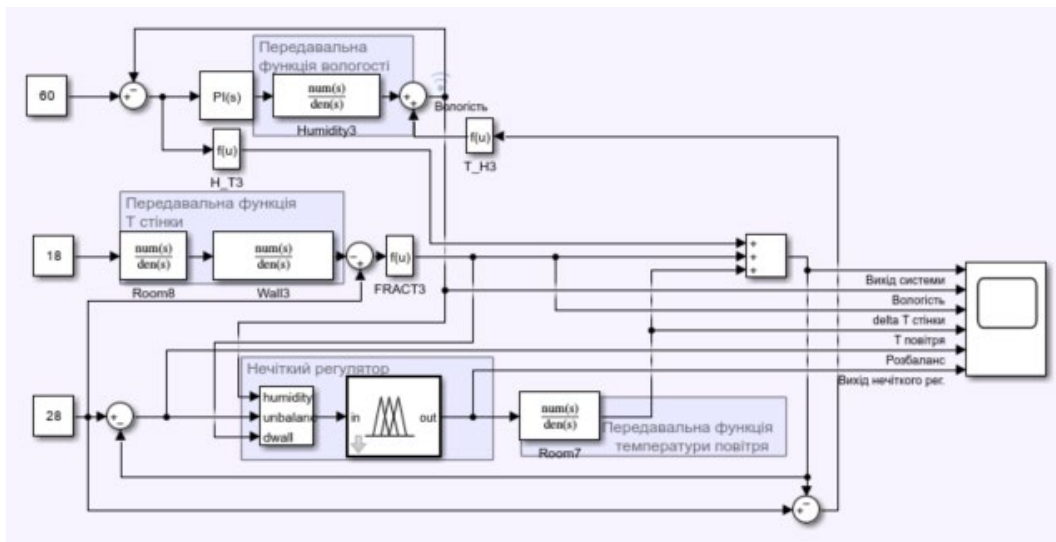


Рис. 11. Схема з нечітким регулятором з використанням додаткових параметрів

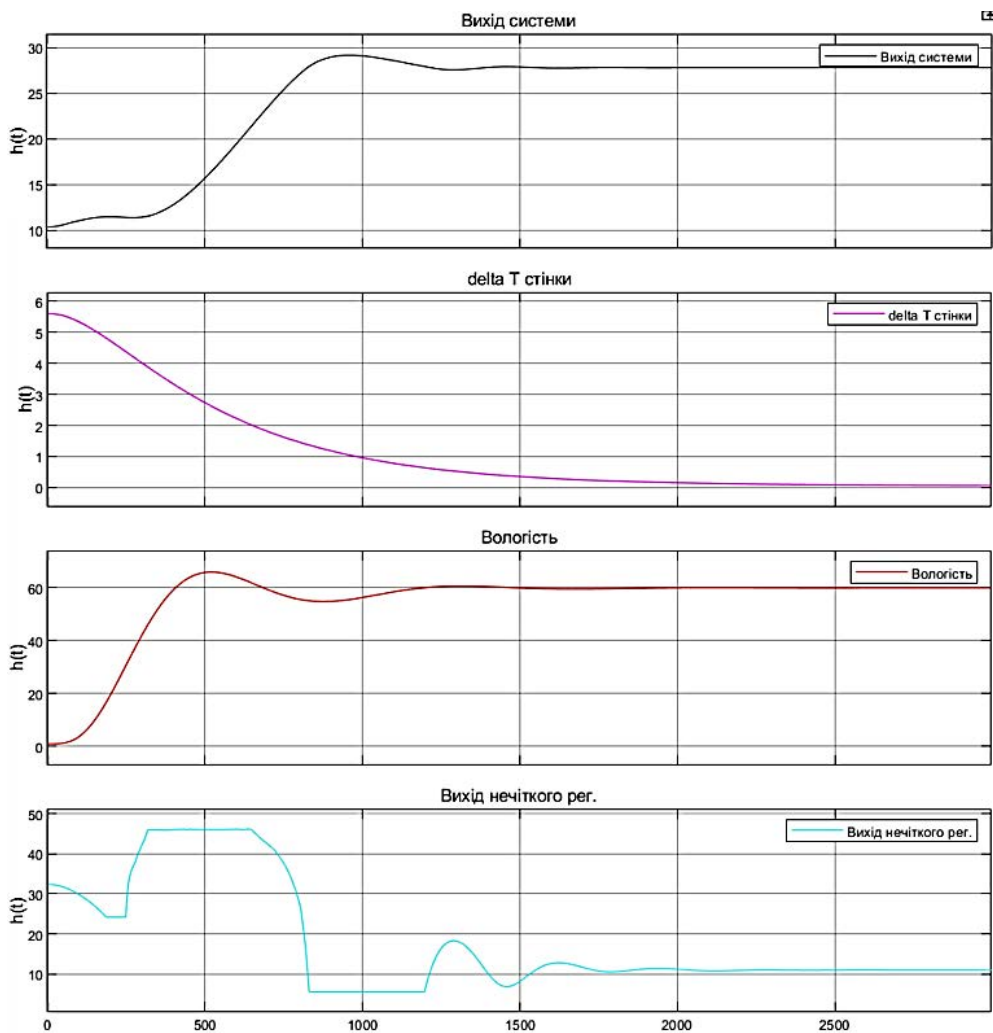


Рис. 12. Графіки зміни параметрів мікроклімату та вихідний сигнал нечіткого регулятора

з нечітким регулятором, практично за всіма показниками показала кращі результати, особливо за часом перехідного процесу та перерегулюванням. Тим не менш, слід визнати, що такі результати можливі лише за умови налаштування на певний робочий діапазон, на противагу універсальності роботи традиційної системи з ПІ-регулятором.

Таблиця 1
Порівняння прямих показників якості для нечіткого та ПІ-регулятора

Показник якості	ПІ	Нечіткий регулятор
Статична похибка $\Delta_{ст}$	0	0
Динамічна похибка $\Delta_{дин}$	7.82	1.35
Перерегулювання $\sigma, \%$	28	4.9
Коефіцієнт затухання ψ	1	0.93
Час перехідного процесу $t_{пер}, c$	1557.8	777.5

Висновки. В статті запропоновано рішення, що дозволяє врахувати зовнішні збурення та взаємозв'язок параметрів мікроклімату на основі алгоритмів нечіткої логіки. Проведено моделювання роботи системи з нечітким регулятором в умовах взаємовпливу параметрів мікроклімату та під впливом додаткових зовнішніх збурень та доведено її працездатність. Розраховано налаштування регулятора традиційної системи автоматичного регулювання з ПІ-регулятором методом розширених амплітудно-фазових характеристик. Порівняно роботу системи з нечітким регулятором з традиційною системою регулювання та показано переваги системи з нечітким регулятором над системою з ПІ – регулятором, як з точки зору якості регулювання, так і з точки зору гнучкості роботи.

Список літератури:

1. Штіфзон О. Й., Новіков П. В., Бунь В.П. Теорія автоматичного управління. [Електронний ресурс]: Навчальний посібник / НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Електронні текстові дані. Київ, 2020. 144 с. 1 файл: 2,2 Мбайт.
2. Cinar I., Ozkan I. A., Koklu M. Fuzzy Logic Based Controller Design for Control of Ventilation Systems. *Proceedings of the International Conference on Engineering Technologies (ICENTE'18)* (26–28 October 2018, Konya, Turkey). Konya, 2018. P. 194–199.
3. Сахарнацька Л. І., Кочут Р. А. Особливості розвитку деревообробної промисловості в умовах воєнного стану. *Збалансоване природокористування*. 2023. № 3. С. 59–67. DOI: 10.33730/2310-4678.3.2023.287817.
4. Кизим М. О., Губарева І. О., Хаустова В. Є., Іванова О. Ю., Крячко Є. М., Колбасін Є. С., Харченко Р. В. Деревообробна промисловість України та країн світу: стан, проблеми і перспективи розвитку: кол. моногр. / за ред. М. О. Кизима, І. О. Губаревої. Харків: ФОП Лібуркіна Л. М., 2021. 272 с.
5. Kasahara M., Kuzuu Y., Matsuba T., Hashimoto Y., Kamimura K., Kurosu S. Physical Model of an Air-Conditioned Space for Control Analysis. *ASHRAE Transactions*. 2000. Vol. 106, Pt. 2. P. 4400–4414.
6. Popescu D. Specific problems on the operation of the automatic control system of temperature into an individual dwelling. *WSEAS Transactions on Systems*. 2014. Vol. 13. P. 482–491.
7. Shtifzon, O., Novikov, P. and Bahan T. Development of adaptive fuzzy-logic device for control under conditions of parametric non-stationarity. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1, № 2 (91). P. 30–37. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.121749.

Shtifzon O.Y., Yudin O.S. MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM USING FUZZY LOGIC FOR STORAGE FACILITIES AT A WOODWORKING ENTERPRISE

The article describes the system for regulating the microclimate parameters of a warehouse of a woodworking enterprise using fuzzy logic. The requirements for warehouse-type premises were determined based on the requirements for storing finished products. The control object was a supply and exhaust ventilation installation with a section for maintaining microclimate parameters (heating, cooling, humidification). The problems and requirements for regulating microclimate parameters, in particular temperature, under conditions of non-stationarity and in the presence of additional external disturbances are considered. The structures of automatic control systems that are traditionally used to solve such problems are analyzed. The practical impossibility of building a system taking into account all influencing factors within the traditional approach to designing such systems is shown. A proposed solution allows to take into account external disturbances together with relationship of microclimate parameters based on fuzzy logic algorithms. At the stage of synthesis of the fuzzy control system, the functional scheme of automation by the supply and exhaust ventilation system was fully examined. The operation of a system with a fuzzy controller under the simultaneous action of several external disturbances is simulated. The settings of the controller of a traditional automatic control system with a proportional-integral (PI) controller are calculated using the method of extended amplitude-phase characteristics. The operation of a system with a fuzzy controller is compared with a traditional control system based on a PI controller. Based on the simulation, the advantages of a system with a fuzzy controller over a system with a PI controller are shown, both in terms of control quality and in terms of flexibility of operation. The operability of a system with a fuzzy controller under the combined influence of external disturbances is proven. A simple and convenient way to configure a system with a fuzzy controller with a minimum set of rules is proposed.

Keywords: fuzzy logic, membership function, external disturbance, modeling, quality indicators.

Дата першого надходження статті до видання: 27.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 23.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026