

### Опришко Олексій Олександрович

доцент, кандидат технічних наук, в.о. завідувача кафедри автоматизації та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-3566>

E-mail: [ozon.kiev@nubip.edu.ua](mailto:ozon.kiev@nubip.edu.ua)

### Плем'яник Валерія Русланівна

студент освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» ОС «Магістр»,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: [akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua](mailto:akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua)

## РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ СКЛАДСЬКОГО ПРИМІЩЕННЯ МИТНОГО ТЕРМІНАЛУ

**Анотація.** У статті розглянуто актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності функціонування митних терміналів України в умовах постпандемічних викликів, зокрема забезпечення належних параметрів мікроклімату складських приміщень. Обґрунтовано необхідність впровадження систем автоматичного керування для підтримання температури, вологості та якості повітря з метою збереження товарів і забезпечення безпечних умов праці персоналу. Проведено аналіз сучасних підходів до автоматизації систем вентиляції та кондиціонування, визначено їхні обмеження щодо застосування в специфічних умовах митних об'єктів. Розроблено функціональну схему автоматизації припливно-витяжної вентиляційної системи з рекуперацією тепла та створено математичну модель температурного режиму будівлі митного терміналу на основі рівнянь теплового балансу. На базі імітаційного моделювання у середовищі MATLAB/Simulink синтезовано цифрову систему керування з ПІ-регулятором та визначено її параметри. Дослідження показали, що запропонована система забезпечує стійке та точне регулювання без перерегулювання і статичної похибки, а також ефективно підтримує якість повітря. Підтверджено асимптотичну стійкість системи за критерієм Джурі та доведено її практичну доцільність. Запропоновано комплексне технічне рішення на базі сучасного програмованого логічного контролера (ПЛК110), що забезпечує високу дискретність обробки сигналів та надійність у промислових умовах. Практична значущість роботи підкреслюється розробкою людино-машинного інтерфейсу (HMI) для дистанційного моніторингу, що забезпечує прозорість логістичних процесів та можливість оперативного втручання персоналу. Результати моделювання та техніко-економічні розрахунки доводять, що впровадження запропонованої системи дозволяє знизити енерговитрати на підтримку мікроклімату на 15-20% при одночасному підвищенні точності стабілізації параметрів. Отримані результати можуть бути використані для модернізації митної інфраструктури та впровадження цифрових систем моніторингу і керування мікрокліматом у складських приміщеннях.

**Ключові слова:** автоматизація, мікроклімат, митний термінал, програмований логічний контролер, алгоритм керування, CoDeSys, енергоефективність, моніторинг.

**Актуальність.** Пандемія вірусу COVID-19 та її наслідки суттєво вплинули на економіку та всі складові державної політики України. Найбільших випробувань та трансформацій зазнала митна справа. Питанням розвитку митної політики та забезпечення митної безпеки України в екстремальних умовах займалися такі вітчизняні дослідники, як Осіпчук Д. С., Підгорний О. Ю. та інші, які у своїх працях досліджували механізми адаптації митних органів до кризових ситуацій, адміністрування митних платежів та забезпечення безперебійного

функціонування логістичних ланцюгів в умовах глобальних викликів [1]. Поява цих викликів зумовила виникнення гострої потреби у забезпеченні суворого контролю за умовами зберігання вантажів на митних терміналах.

Поява пандемії зумовила виникнення таких проблем у внутрішньому стані митної політики України:

- зменшення прибутковості бізнесу через закриття деяких митних постів та введення карантинних обмежень;
- посилення вимог для юридичних та фізичних осіб при проходженні митного контролю і ускладнення його;
- неготовність митної служби перейти у дистанційний режим обслуговування громадян;
- відсутність належного фінансового забезпечення, яке б дозволило швидко переорієнтуватись митниці, відповідно до погіршення економічного стану в країні;
- збільшення скарг учасників митного процесу на діяльність митної системи;
- зростання випадків контрабанди та корупції в органах митної служби;
- недостатній рівень інформування населення та власників підприємств про правила проведення митного процесу у період карантину;
- погана обізнаність працівників митниці щодо виконання посадових обов'язків у період пандемії;
- повільний етап проведення вакцинації серед працівників митниці;
- низький рівень епідеміологічного захисту працівників митниці, що призвів до захворюваності вірусної інфекцією серед них.

У цей період виникла гостра потреба у забезпеченні суворого контролю за умовами зберігання вантажів на митних терміналах. Ефективне функціонування таких об'єктів неможливе без впровадження високоточних систем автоматичного керування (САК) мікрокліматом. Недотримання параметрів температури та вологості повітря у складських приміщеннях призводить до значних економічних збитків через псування товарів, що перебувають під митним контролем.

Використання мікропроцесорних засобів автоматизації, зокрема програмованих логічних контролерів (ПЛК), дозволяє не лише стабілізувати ці параметри, а й забезпечити віддалений моніторинг у реальному часі. Це є критично важливим для забезпечення прозорості та безпеки митних операцій у післяпандемічний період. Таким чином, розроблення надійної цифрової САК мікрокліматом складського приміщення митного терміналу є актуальним науково-технічним завданням, спрямованим на модернізацію транспортно-логістичної інфраструктури України.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Проблематика автоматизації систем забезпечення мікроклімату (HVAC) та вибору алгоритмів керування широко висвітлена в сучасній науковій літературі. Дослідження методів математичного моделювання температурних режимів та оптимізації мікроклімату проводили Зубенко В.О. та Березюк І.А. [2], які довели, що для усунення дефіциту або надлишку тепла необхідно враховувати теплову інерційність конструкцій та масу повітря. Питання забезпечення інваріантності систем автоматичного керування до зовнішніх збурень розглядалися у працях Збруцького О.В. та Осокіна В. С. [3], які довели, що використання інтегральної складової у структурі регулятора (зокрема, ПІ- чи ПІД-закону) дозволяє компенсувати накопичену похибку та гарантувати задану точність системи навіть за умов тривалих випадкових збурень.

Надійність архітектур на базі програмованих логічних контролерів (ПЛК) для систем моніторингу та регулювання мікроклімату підтверджена результатами досліджень Братішка В.В. та Граняка В.Ф. [4], які довели високу ефективність та завадостійкість застосування ПЛК для безперебійної реєстрації температурних параметрів в умовах промислової експлуатації. Водночас, хоча для складних об'єктів часто пропонуються нейромережеві системи керування, їх впровадження стримується високою обчислювальною

складністю та потребою в специфічному обладнанні, що робить класичні цифрові ПІ-регулятори більш доцільними та надійними для стандартної автоматизації. Окремим важливим напрямом є дослідження Макаренко Л. та Приймака О. [5], які обґрунтували необхідність забезпечення оптимальної кратності повітрообміну та моніторингу якості повітря (зокрема за рівнем CO<sub>2</sub>) для зниження ризику передачі інфекцій та дотримання жорстких санітарно-гігієнічних вимог ВООЗ у закритих приміщеннях.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених автоматизації систем HVAC, питання розробки цифрових алгоритмів керування мікрокліматом, адаптованих до специфічних умов роботи сучасних митних терміналів, залишається недостатньо вивченим. Більшість існуючих рішень не враховують необхідність комплексного підходу, який би одночасно забезпечував жорсткі температурні режими для збереження різнотипних вантажів та епідеміологічний захист персоналу шляхом моніторингу концентрації вуглекислого газу.

**Метою дослідження** є розробка системи автоматичного керування параметрами мікроклімату на митному терміналі для забезпечення оптимального температурно-вологісного режиму роботи митного персоналу, запобігання потраплянню іноземних вірусів і хвороб у країну, покращення умов зберігання митних товарів, із операторським інтерфейсом системи контролю та керування.

Задачі досліджень:

- дослідження особливостей формування мікрокліматичного режиму на території митних терміналів, принципів побудови припливно-витяжних систем вентиляції із рекуперацією тепла в таких приміщеннях;
- розробка функціональної схеми системи керування припливно-витяжною вентиляційною системою митного терміналу і алгоритму її роботи;
- розробка і дослідження імітаційної моделі об'єкта автоматизації із використанням пакету імітаційного моделювання MatLAB;
- обґрунтування вибору алгоритму керування, комплексу технічних засобів автоматизації, визначення показників якості роботи системи керування;
- розробка схем системи автоматизації та системи дистанційного керування та контролю із операторським інтерфейсом.

**Матеріали і методи дослідження.** Дослідження ґрунтуються на основних положеннях тепломасообміну, математичного моделювання, теорії автоматичного керування з використанням комп'ютерних технологій.

Для реалізації алгоритмів керування та візуалізації технологічних процесів використано методи програмування логічних контролерів у середовищі CoDeSys. Процес проектування включав конфігурування апаратної частини, розробку логічної структури керування та налаштування протоколів обміну даними для забезпечення віддаленого моніторингу параметрів мікроклімату.

*Опис об'єкту автоматизації*

Об'єктом дослідження є процес керування параметрами мікроклімату в приміщеннях митних терміналів. Митний термінал (англ. customs terminal) – це комплекс адміністративних складських приміщень, призначених для проведення в повному обсязі процедур митного контролю та оформлення вантажів, які переміщуються експрес-перевізниками й знаходяться під митним контролем [6]. Цей спеціалізований об'єкт логістичної інфраструктури використовується для проведення митних процедур під час здійснення зовнішньоекономічної діяльності, зокрема митного оформлення вантажів, які перетинають митний кордон. Митний термінал представляє собою комплекс приміщень різного призначення: зберігання митних товарів, приміщень карантинної зони, чистого приміщення для зберігання медичних і ветеринарних препаратів, а також вентиляційної камери, де знаходиться вентиляційна система з функціями подвійної фільтрації, рекуперації, охолодження, нагріву та зволоження повітря.

До складу митних терміналів можуть входити такі приміщення, як митний склад – це митний режим, відповідно до якого іноземні або українські товари зберігають під митним контролем за певних умов, які визначені Митним кодексом України. На території сучасних митних терміналів і складів повинні підтримуватися контрольовані умови мікроклімату з метою зберігання різних видів товарів відповідно до їх фізико-хімічного складу. Температура повітря у приміщеннях митних терміналів, де зберігаються різні види товарів, повинна складати близько  $+18...+22^{\circ}\text{C}$ , в спеціальних холодних зонах – до  $+4^{\circ}\text{C}$  [7].

Мікроклімат митного терміналу – це не просто температура та вологість, а й сукупність факторів, які визначають комфорт та умови роботи у приміщеннях, де проводиться митний контроль. Завданням системи автоматизації є контроль температури, відносної вологості та концентрації вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  у приміщеннях митного терміналу в заданих межах, а також керування вентиляційною системою та відображення параметрів її роботи.

На даний час використовуються різноманітні рішення для забезпечення параметрів мікроклімату промислових приміщень, до складу яких входять і митні термінали, але найбільшої ефективності набули припливно-витяжні системи вентиляції з рекуперацією тепла ПВСВР (рис. 1). Найбільш поширеними серед названих систем є системи повітрообміну із роторними та пластинчастими рекуператорами, а також із проміжними рекуператорами (run-around coil system) [8].

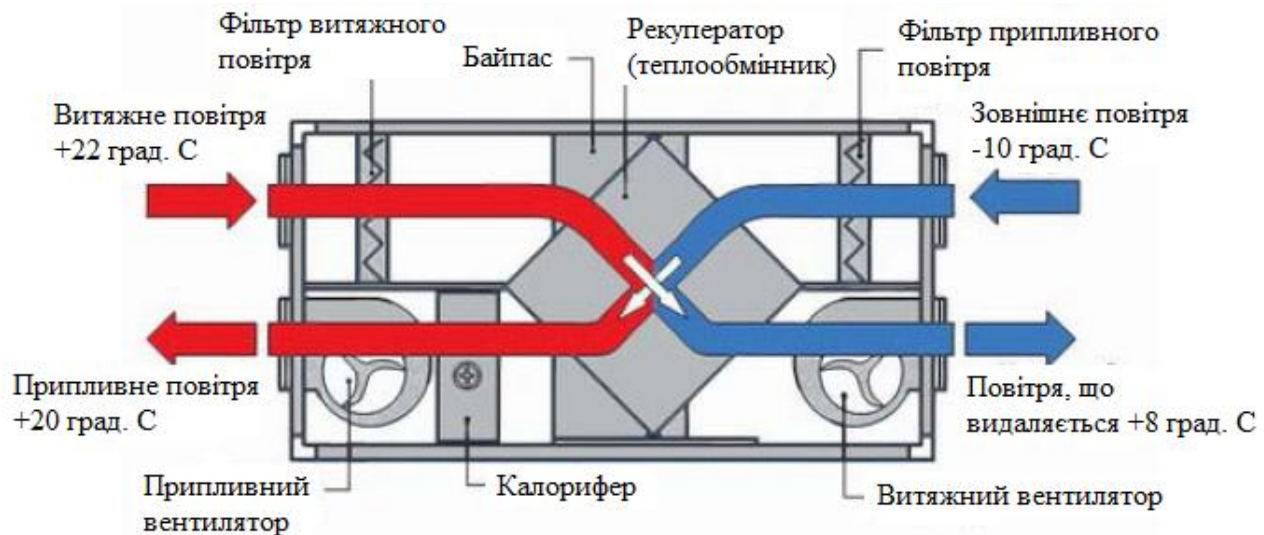


Рисунок 1 – Узагальнена схема припливно-витяжної системи вентиляції з рекуперацією тепла

Для реалізації зазначених процесів підготовки повітря розроблено функціональну схему автоматизації припливно-витяжної вентиляційної установки з рекуператором (рис. 2). Основний контроль температури здійснюється у трьох позиціях:

- температура зовнішнього припливного повітря вимірюється датчиком ТЕ (1-1);
- температура підготовленого вентиляційного повітря – датчиком ТЕ (1-2);
- температура повітря безпосередньо у приміщенні терміналу – датчиком ТЕ (1-3).

Для моніторингу додаткових параметрів встановлені датчики температури теплоносія та датчик концентрації вуглекислого газу QE (1-4). Керування електродвигунами приводу відцентрових вентиляторів М1 (приплив) та М2 (витяжка) здійснюється за допомогою частотних перетворювачів, а регулювання роботи водяного нагрівача та охолоджувача виконується змішувальними вузлами з сервоприводами.

#### Математична модель температурного режиму

Для розробки системи керування складемо статичну модель технологічного об'єкта за каналом керування температурним режимом. Для цього представимо об'єкт у вигляді двох

ланок, які акумулюють енергію: це ланка підігрівачої води і ланка повітря в опалюваних приміщеннях (рис. 3).

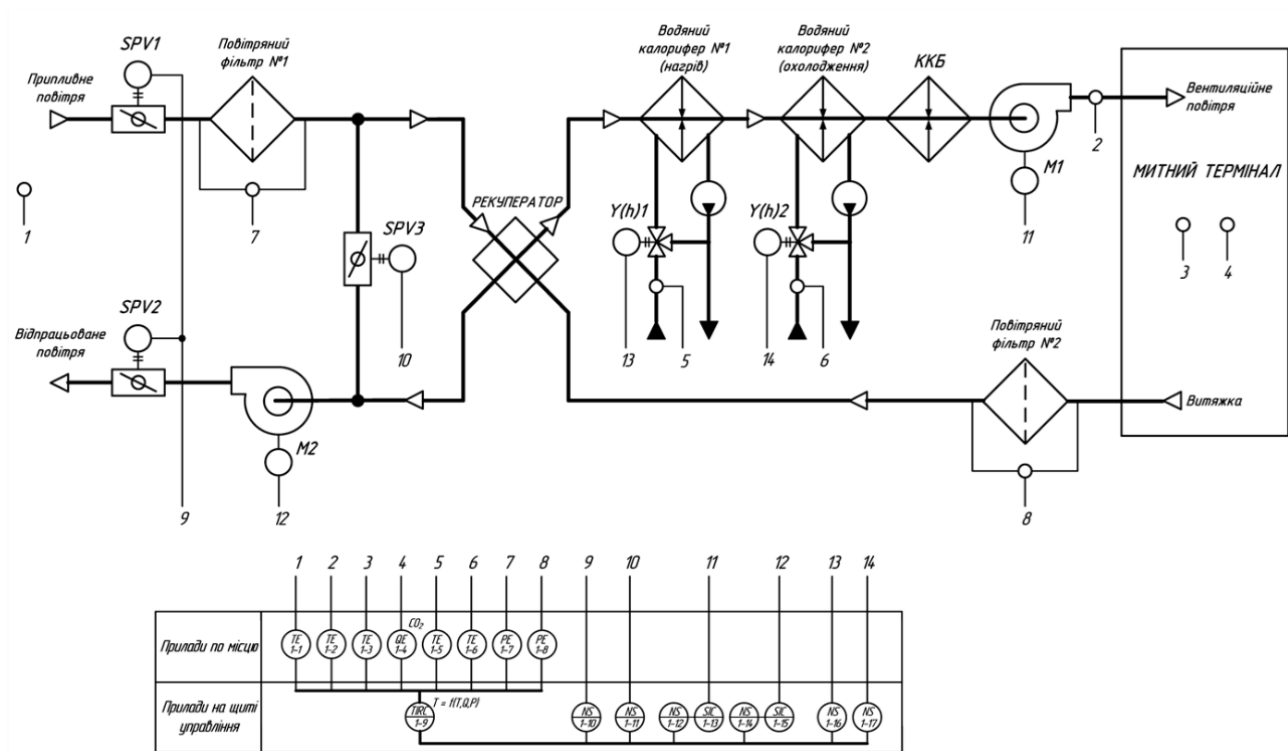


Рисунок 2 – Функціональна схема автоматизації припливно-витяжної вентиляційної установки із рекуператором для приміщень митного терміналу

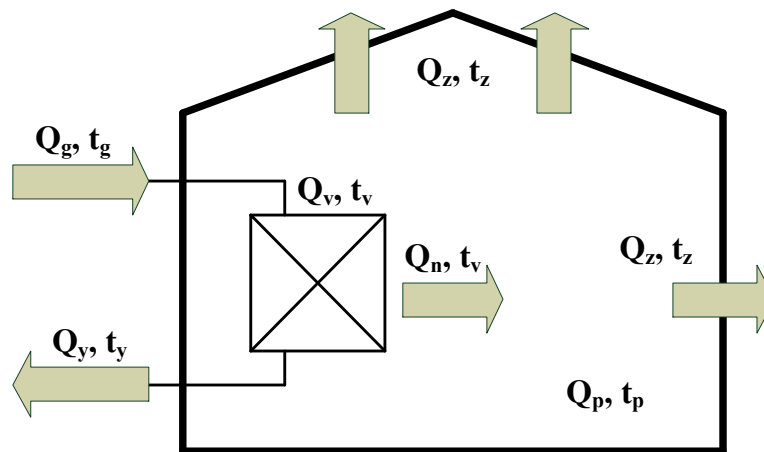


Рисунок 3 – Схема теплових потоків у будівлі митного терміналу

Для подальших розрахунків приймаємо, що температура повітря в будівлі  $t_p$  однакова для всього об'єму, а температура води в радіаторах системи та трубах  $t_v$  має середньоарифметичне значення між вхідною температурою гарячої води  $t_g$  і температурою води на виході з будівлі  $t_y$ . В статичному режимі кількість тепла, що знаходиться у воді  $Q_v$ , і тепла, що знаходиться у повітрі будівлі  $Q_p$ , лишається незмінним, тому можемо записати два рівняння теплових балансів:

$$\text{для води: } Q_g - Q_y - Q_n = 0,$$

$$\text{для повітря будівлі: } Q_n - Q_z,$$

(1)

де  $Q_g$  – кількість тепла, що надійшло з водою;  $Q_y$  – тепло, виведене з водою;  $Q_n$  – тепло, що перейшло до повітря;  $Q_z$  – тепло, втрачене в навколишній простір [9].

Від статичної моделі перейдемо до динамічної. Враховуючи рівняння статики, отримаємо систему диференціальних рівнянь зміни кількості тепла в часі у воді і повітрі будівлі. Після відповідних математичних спрощень приведемо рівняння до вигляду Коші:

$$\frac{dt_v}{dt} = \frac{C_g \cdot G_g \cdot \rho_g \cdot t_g - C_y \cdot G_y \cdot \rho_y \cdot (2 \cdot t_v - t_g) - \alpha_p \cdot F_t \cdot (t_v - t_p)}{C_v \cdot V_v \cdot \rho_v}$$

$$\frac{dt_p}{dt} = \frac{\alpha_p \cdot F_t \cdot (t_v - t_p) - k_z \cdot F_c \cdot (t_p - t_z) \cdot \eta_0}{C_p \cdot V_p \cdot \rho_p}$$

(2)

де  $C_v$  – питома теплоємність води;  $G_n$  – продуктивність насоса;  $\rho_v$  – густина води;  $t_v$  – температура води;  $V_v$  – об'єм води в системі;  $C_p$  – питома теплоємність повітря;  $\rho_p$  – густина повітря;  $t_p$  – температура повітря;  $V_p$  – об'єм будівлі;  $k_z$  – коефіцієнт теплопередачі;  $F$  – площа поверхні;  $\alpha_p$  – коефіцієнт тепловіддачі від повітря будівлі до огорожуючих конструкцій;  $\eta_0$  – коефіцієнт огороження будівлі.

У пакеті імітаційного моделювання MATLAB Simulink синтезована імітаційна математична модель динаміки зміни температури повітря в будівлі та температури теплоносія (рис. 4). В результаті дослідження динаміки процесу на розробленій імітаційній моделі була отримана розгінна характеристика будівлі по каналу регулювання температури повітря (рис. 5).

Для статичних об'єктів передатна функція, отримана за кривою розгону, представляється у вигляді інерційної ланки із запізненням. Значення постійної часу та часу чистого запізнення, визначені з нормованої розгінної характеристика будівлі, складають  $T_{0y} = 2000$  с,  $\tau_{0y} = 100$  с. Відповідно, передатна функція будівлі для каналу "потужність нагрівача  $\rightarrow$  температура повітря" має вигляд:

$$W_{0y}(s) = \frac{0,27e^{-100 \cdot s}}{2000s + 1}.$$

#### Синтез і дослідження цифрового ПІ-регулятора

Задача вибору раціонального періоду квантування  $T_k$  є однією з основних проблем реалізації цифрової системи керування. Тому виникає проблема пошуку раціонального часу квантування  $T_k$ , який задовольнив би суперечливі вимоги. Згідно з теоремою Котельникова, для безпомилкового відтворення сигналу мінімальна частота квантування повинна дорівнювати  $2w_c$ , де  $w_c$  – найвища частота вихідного сигналу, що зустрічається в амплітудно-частотній характеристиці неперервної частини системи. Теорема стверджує: якщо сигнал не містить в собі частот вище, ніж  $w_c$  рад/с, він повністю описується своїми значеннями, вимірними у дискретні моменти часу за інтервалом [9]:

$$T_k = \pi w_c.$$

Визначення передатної функції неперервної частини розімкнутої системи:

$$W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(p) = \frac{K_6 K_0}{T_{\text{эм}} T_{\text{оу}} p^2 + (T_{\text{е}} + T_{\text{о}}) p + 1} = \frac{0,27 e^{-100p}}{1280 p^2 + 2001 p + 1} \quad (3)$$

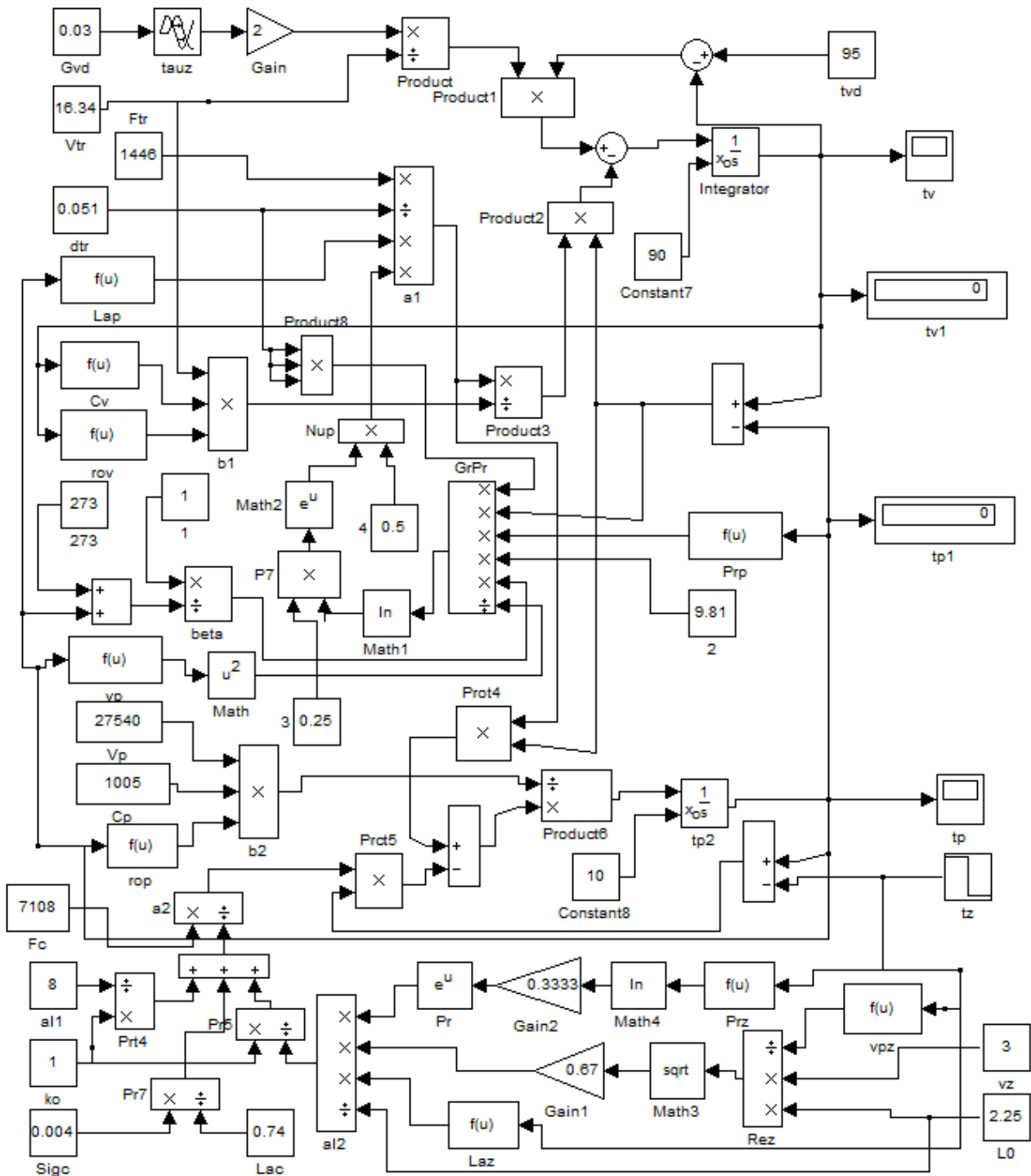


Рисунок 4 – Блок-схема імітаційної моделі енерговитрат у системи опалення будівлі з використанням пакету MATLAB Simulink

Визначаємо передатну функцію неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам.}}^{\text{н.ч.}}(p) = \frac{W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(p)}{1 + W_{\text{роз.}}^{\text{н.ч.}}(p)} = \frac{0,27 e^{-100p}}{(1280 + 2001 p + 1) + 0,27 e^{-100p}} \quad (4)$$

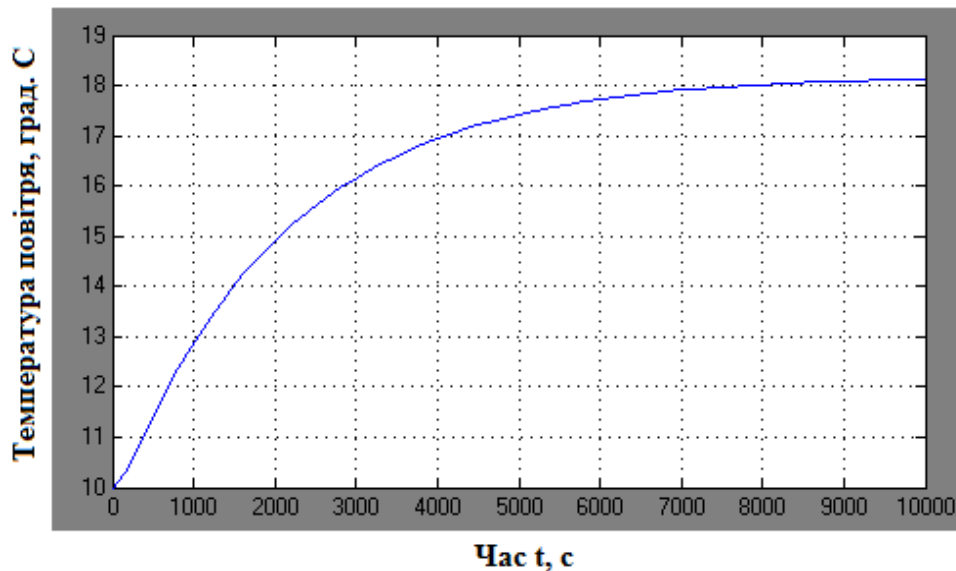


Рисунок 5 – Розгінна характеристика будівлі для каналу регулювання температури повітря

Визначення амплітудно-частотної характеристики неперервної частини замкненої системи:

$$W_{\text{зам}}(j\omega) = \frac{0,27e^{-100j\omega}}{(1280j\omega^2 + 2001j\omega + 1) + 0,27e^{-100j\omega}} \quad (5)$$

У результаті розв'язання рівняння

$$A(\omega) = \frac{K_B K_0}{\sqrt{(-T_B T_0 \omega^2 + 1 + K_B K_0)^2 + (T_B T_0)^2 \omega^2}} = 0.01.$$

Отримаємо значення частоти за рис. 6:  $\omega_c = 0.013$ .

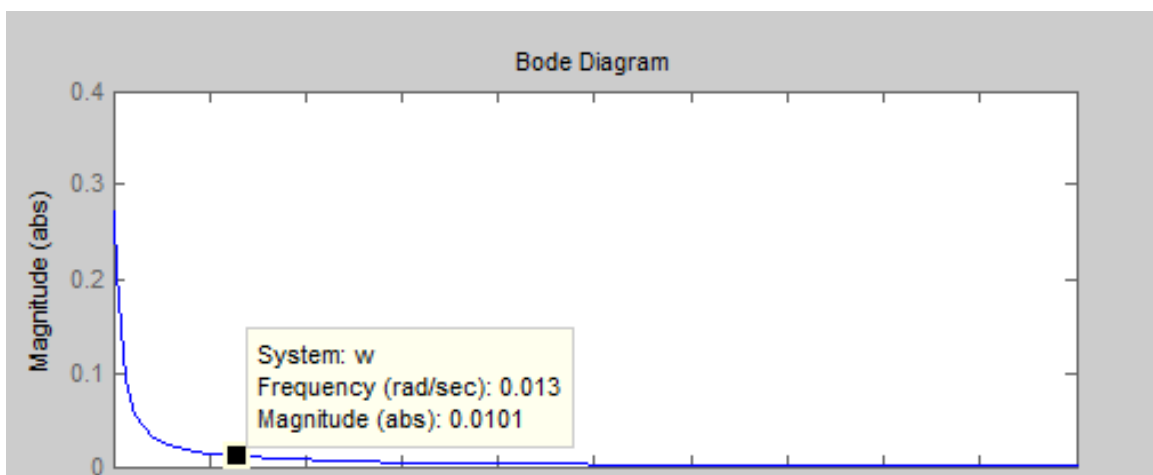


Рисунок 6 – АФЧХ системи керування

Значення часу квантування:

$$T_k = \frac{\pi}{\omega_c} = 241 \text{ с.} \quad (6)$$

Аналогічно неперервним системам, закон ПІ-регулювання може бути реалізований у цифрових системах. Для визначення передатної функції дискретної системи застосовується пакет програм MATLAB із використанням операцій задання передатної функції неперервної системи та Z-перетворення неперервної передатної функції на дискретну

$$wz = c 2 d(w, T),$$

де  $w$  – змінна, що отримала вираз неперервної передаточної функції;  $T$  – крок квантування [10].

Тоді

$$K_i := \frac{0.008}{\left( \frac{0.0208 \cdot 1 + 0.009133 - 0.000000000000000000507}{1^3 - 0.8903 \cdot 1^2 + 0.0000000000000000009885 \cdot 1 + 0} \right)} = 0.$$

Після знаходження  $K_i$  параметр  $K_p$  визначаємо таким чином, щоб компенсувати полюс Z-перетворення неперервної частини системи.

Передаточна функція ПІ-регулятора має вигляд:

$$W_{PI}(z) = \frac{K_i \cdot Tz + 1}{2(z - 1)} = \frac{(2 \times K_p + K_i \times T) \left[ z + \frac{K_i \times T - 2 \times K_p}{2 \times K_p + K_i \times T} \right]}{2(z - 1)}.$$

Для компенсації полюсу необхідно знайти такий  $K_p$ , який би задовольняв рівняння:

$$\frac{K_i \cdot T - 2 \cdot K_p}{K_i \cdot T + 2 \cdot K_p} = 0.0001974,$$

відповідно

$$K_p = 8.031.$$

Для дослідження показників якості роботи системи використовуємо модель у програмному середовищі MATLAB/Simulink (рис. 7).

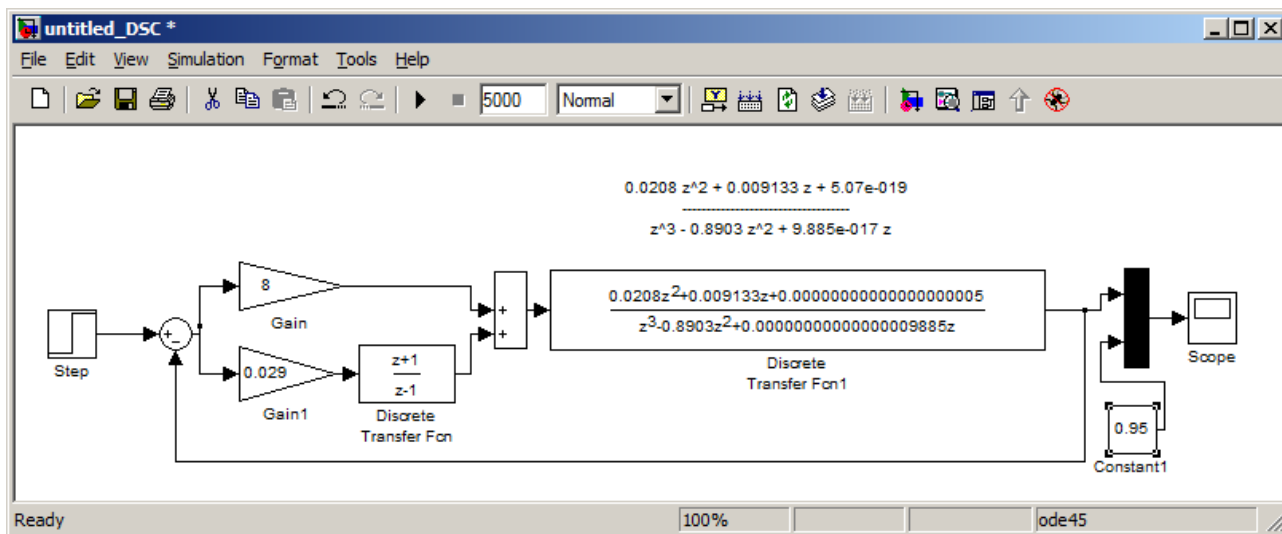


Рисунок 7 – Структурна модель цифрової системи

*Дослідження цифрової системи на стійкість та якість*

Використовуючи розімкнуту передаточну функцію цифрової системи  $W_{роз}(z)$ , знайдемо  $W_{зам}(z)$ , розв'яжемо рівняння та знайдемо характеристичні корені [11]:

$$W_{зам}(z) = \frac{\frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.8903z^2 - 9.885z \cdot 10^{-17}}}{\frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.8903z^2 - 9.885z \cdot 10^{-17}} + 1} =$$

$$= \frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.9106z^2 - 9.8835z + 5.07 \cdot 10^{-19}}$$

$$W_{пер}(z)W_{зам} = \frac{22.989 \cdot z - 2}{2z - 2} * \frac{0.0208z^2 + 0.009113z + 5.07 \cdot 10^{-19}}{z^3 - 0.9106z^2 - 9.8835z + 5.07 \cdot 10^{-19}}$$

$$W(z) = \frac{-0.082117242 \cdot z - 0.034519123 \cdot z^2 + 0.62254212 \cdot z^3 - 4.568577e - 18}{19.767 \cdot z - 17.965 \cdot z^2 - 3.802 \cdot z^3 + 2 \cdot z^4 - 1.014e - 18}$$

**Результати дослідження.** Розроблена математична модель теплової динаміки будівлі митного терміналу була реалізована в середовищі MATLAB/Simulink і використана для синтезу та аналізу цифрової системи ПІ-регулювання. Перехідні характеристики системи із замкнутим контуром, оснащеної розробленим цифровим ПІ-регулятором, наведено на рис. 8. Сигнал на виході представлено в нормованому вигляді, що дозволяє безпосередньо оцінити якість регулювання незалежно від фізичних одиниць вимірювання. Результати моделювання показують, що система керування забезпечує стабільну та добре загасаючу поведінку.

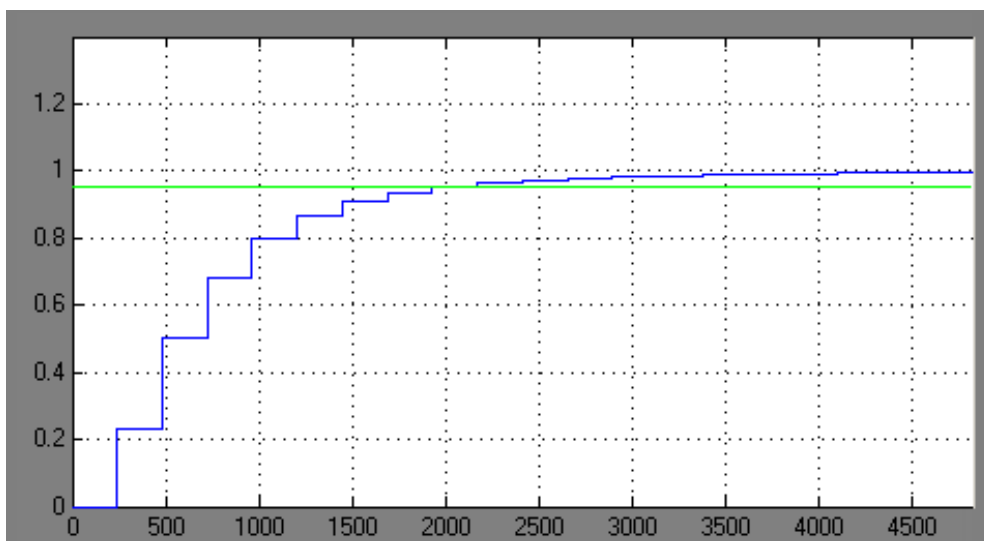


Рисунок 8 – Перехідний процес цифрової системи з ПІ-регулятором

Система досягає стаціонарного значення без перевищення та коливань. Час встановлення ( $t_p$ ) системи становить приблизно 1970 с, при цьому перевищення дорівнює  $\sigma = 0$ , а індекс коливань  $n = 0$ . Крім того, похибка в стаціонарному режимі дорівнює  $\delta = 0\%$ , що підтверджує повне компенсування статичної похибки інтегральною складовою ПІ-регулятора та високу точність регулювання температури.

Аналіз стійкості на основі критерію Джурі підтвердив, що всі корені характеристичного рівняння лежать всередині одиничного кола на комплексній площині, що доводить

асимптотичну стійкість цифрової системи керування. У результаті було отримано таке характеристичне рівняння:

$$19.767 \cdot z + -17.965 \cdot z^2 + -3.802 \cdot z^3 + 2 \cdot z^4 - 1.014e - 18 = 0.$$

Домінуючі комплексні корені були отримані як

$$z_{1,2} = 0,7464 \pm j0,0237,$$

тоді як третій корінь дорівнює

$$z_3 = 0.$$

Умови стійкості за критерієм Джурі:

$|zk| < 1$  – для дійсних коренів;

$Re^2(zk) + Im^2(zk) < 1$  – для комплексних коренів.

Корені характеристичного рівняння на комплексній площині представлені на рис. 9.

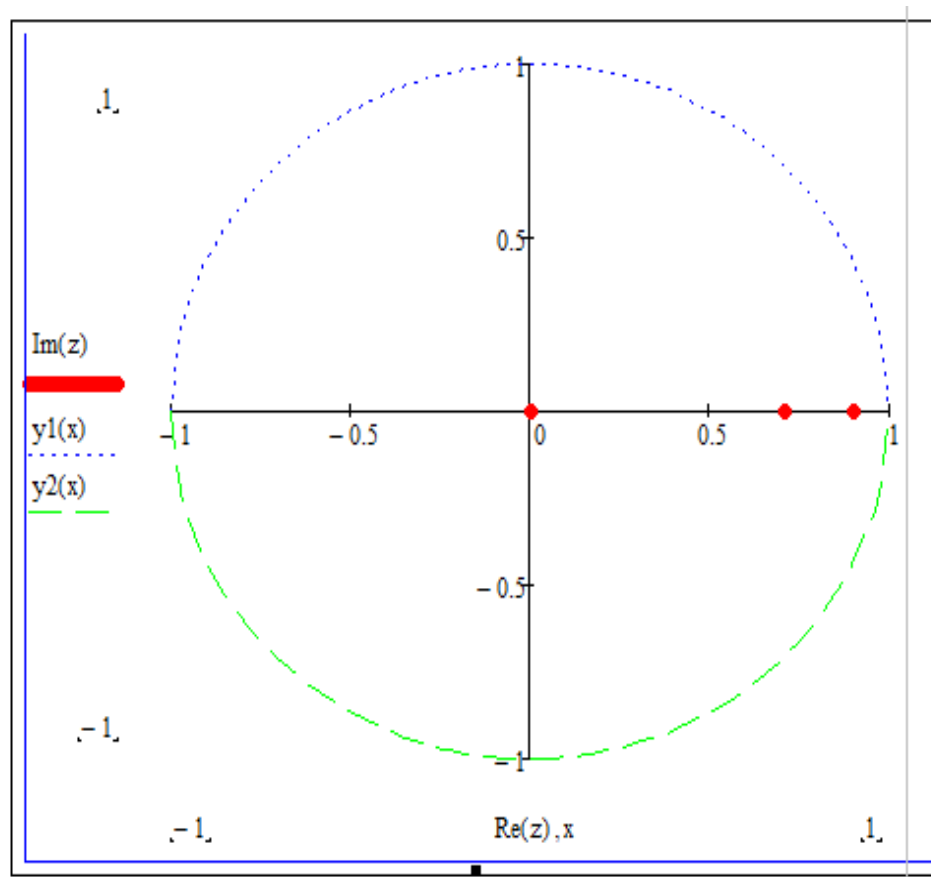


Рисунок 9 – Корені характеристичного рівняння на комплексній площині

Крім того, результати моделювання показують, що запропонована система управління дозволяє підтримувати параметри повітря в приміщенні в межах необхідних робочих меж, зокрема забезпечує ефективне регулювання температури та сприяє зниженню концентрації CO<sub>2</sub> до рівня нижче 700 ppm, що суттєво сприяє поліпшенню якості повітря в приміщенні та зменшенню ризику передачі інфекцій повітряно-крапельним шляхом у приміщеннях митних терміналів.

**Висновки і перспективи.** У результаті проведеного дослідження розроблено систему автоматичного керування параметрами мікроклімату складських приміщень митного

терміналу з використанням комплексу технічних засобів на базі контролера ОВЕН ПЛК110. На основі системного аналізу розроблено функціональну схему автоматизації припливно-втяжної вентиляційної установки з рекуператором, яка забезпечує контроль температури, вологості та рівня вуглекислого газу.

Для визначення динамічних властивостей приміщення терміналу, на основі рівнянь теплового балансу, розроблено математичну та імітаційну модель у середовищі MATLAB/Simulink. Отримано передатну функцію об'єкта за каналом керування температурою повітря.

Синтезована цифрова система керування температурою з ПІ-регулятором забезпечує стабільну роботу та високі показники якості перехідного процесу: час регулювання складає  $t_p = 1970$  с, статична похибка  $\delta = 0$ , перерегулювання відсутнє, коливальність  $n = 0$ . Аналіз за критерієм Джурі підтвердив абсолютну стійкість розробленої цифрової системи. Економічні розрахунки показали, що термін окупності впровадження такої системи складе 1,3 року, що підтверджує доцільність її використання у виробництві.

Оскільки розроблена математична модель базується на спрощених рівняннях теплового балансу, подальші дослідження будуть спрямовані на розширення моделі шляхом врахування нелінійних збурень, таких як змінні витрати повітря, вплив сонячної радіації та динамічні зміни теплових навантажень від персоналу і техніки. Крім того, перспективним напрямом є проведення експериментальної валідації розробленої системи керування на реальному об'єкті митного терміналу для підтвердження результатів імітаційного моделювання в умовах реальної промислової експлуатації.

### References

1. Osipchuk, I. (2021). Osoblyvosti lohistychnykh operatsii na mytnykh terminalakh [Features of logistics operations at customs terminals]. *Economics, Management and Administration*. [https://doi.org/10.26642/ema-2024-4\(110\)-12-17](https://doi.org/10.26642/ema-2024-4(110)-12-17).
2. Zubenko, D. & Bereziuk, O. (2021). Doslidzhennia metodiv matematychnoho modeliuvannia temperaturnykh rezhymiv prymishchen [Optimization of the greenhouse microclimate parameters control process using mathematical modeling]. *Scientific Notes of Taurida National V. I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/28/>.
3. Zbrutskyi, O., Osokin V. (2024). Optyimizatsiia invariantnoi do zburen systemy avtomatychnoho keruvannia [Optimization of a disturbance-invariant automatic control system]. *Mechanics of gyroscopic systems*, 48, 28–35. <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317876>.
4. Hraniak V. Bratishko V. (2024). Metodyka proektuvannia temperaturnoho reiestratora tvarynnytskykh prymishchen na bazi prohramovanoho lohichnoho kompleksu ADC10 [Methodology for designing a temperature recorder for livestock facilities based on the ADC10 programmable logic controller]. *Vibrations in engineering and technology*, 3(114), 127-135. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-3-15>.
5. Makarenko, L., & Priymak, O. (2024). Kratnist povitroobminu yak zasib zabezpechennia vymoh do chystoty povitria na osnovi vysokoeffektyvnykh filtriv [Air exchange rate as a means of ensure requirements to air purity on the basis of high-efficiency filters]. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 46, 18–27. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2023.46.18-27>.
6. Verkhovna Rada Ukrainy. (2012). Mytnyi kodeks Ukrainy [Customs Code of Ukraine]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4495-17>.
7. Minrehion Ukrainy. (2013). DBN V.2.5-67:2013. Opalennia, ventyliatsiia ta kondytsiiuvannia [Heating, ventilation, and air conditioning]. Kyiv.
8. Hulai, B., Kuz, O., & Bundzylo, V. (2025). Analiz efektyvnosti detsentralizovanykh system ventyliatsii z rekuperatsiieiu teploty [Analysis of the effectiveness of decentralized ventilation systems with heat recovery]. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*, 51, 34–45. <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2024.51.34-45>.

9. Parkhomei, I., Pasko, V., Polshakova, O., & Stenin, O. (2020). *Teoriia tsyfrovyykh system upravlinnia* [Theory of Digital Control Systems]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.
10. Tolochko, O. (2024). *Modeliuvannia system avtomatychnoho keruvannia* [Modeling of Automatic Control Systems]. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho.

### **Opryshko Oleksiy**

*Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Acting Head of the Department of Automation and Robotic Systems named by I. Martynenko, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6433-3566>  
E-mail: [ozon.kiev@nubip.edu.ua](mailto:ozon.kiev@nubip.edu.ua)

### **Plemiannyk Valeria**

*Student on the 'Automation, Computer-Integrated Technologies and Robotics' Master's programme, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*  
E-mail: [akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua](mailto:akit25-v.plemiannyk@nubip.edu.ua)

## **DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC MICROCLIMATE CONTROL SYSTEM FOR THE STORAGE AREA OF A CUSTOMS TERMINAL**

**Abstract.** *The article addresses a relevant scientific and technical problem of improving the efficiency of customs terminal operations in Ukraine under post-pandemic challenges, in particular ensuring proper microclimate parameters in warehouse facilities. The necessity of implementing automatic control systems to maintain temperature, humidity, and air quality in order to preserve goods and ensure safe working conditions for personnel is substantiated. An analysis of modern approaches to the automation of ventilation and air conditioning systems is carried out, and their limitations in the specific conditions of customs facilities are identified. A functional automation scheme for a supply and exhaust ventilation system with heat recovery has been developed, and a mathematical model of the temperature regime of a customs terminal building based on heat balance equations has been created. Based on simulation modeling in the MATLAB/Simulink environment, a digital control system with a PI controller has been synthesized and its parameters have been determined. The study shows that the proposed system provides stable and accurate control without overshoot and steady-state error, as well as effective maintenance of air quality. The asymptotic stability of the system has been confirmed using the Jury criterion, and its practical feasibility has been demonstrated. A comprehensive technical solution based on a modern programmable logic controller (PLC110) is proposed, ensuring high signal processing resolution and reliability under industrial conditions. The practical significance of the work is emphasized by the development of a human-machine interface (HMI) for remote monitoring, which ensures transparency of logistics processes and enables prompt intervention by personnel. The simulation results and techno-economic calculations demonstrate that the implementation of the proposed system reduces energy consumption for microclimate maintenance by 15–20% while simultaneously improving the accuracy of parameter stabilization. The obtained results can be used for the modernization of customs infrastructure and the implementation of digital systems for monitoring and controlling the microclimate in warehouse facilities.*

**Keywords:** *Automation, Microclimate, Customs Terminal, Programmable Logic Controller, Control Algorithm, Codesys, Energy Efficiency, Monitoring.*