

НОЗДРЕНКОВ ВАЛЕРІЙ СТАНІСЛАВОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри комп'ютерних наук та системного аналізу, Черкаський державний технологічний університет; м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

ПАВЛОВ АНДРІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

ОЛЕКСІЄНКО ГАЛИНА АНДРІЙВНА – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-5095>; e-mail: galyana2@ukr.net.

ЖУРАВЛЬОВ ОЛЕКСАНДР ЮРІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри комп'ютеризованих систем управління, Сумський державний університет, м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7834-6661>; e-mail: san.75@i.ua.

КОРЕНЕВ МИКОЛА ІВАНОВИЧ – інженер-програміст, ТОВ «НЕТКРЕКЕР», м. Суми, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6929-7281>; e-mail: nikolaj.korenev99@gmail.com

АДАПТИВНЕ ТРЬОХПОЗИЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЄЮ В ПРИМІЩЕННЯХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ ІЗ РИЗИКОМ НАКОПИЧЕННЯ ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ

У статті розглядається методика трьохпозиційного дискретного керування вентиляційною системою приміщень енергетичних підприємств із підвищеним ризиком утворення вибухонебезпечного газового середовища. Основну увагу приділено двом типовим джерелам газоутворення: метану – у приміщеннях із газовими електрогенераторами, та водню – в акумуляторних залах, що утворюється під час заряджання свинцево-кислотних батарей. Запропоновано підхід до переходу від двопозиційного («On-Off») до трьохпозиційного керування вентиляційним приводом на основі адаптаційної характеристики, отриманої для ПІД-регулятора з заданими параметрами. Реалізація керування здійснюється за допомогою асинхронного електродвигуна зі схемою перемикачів «зірка-трикутник-вимкнено», що дозволяє дискретно змінювати режим роботи витяжної вентиляції. Автоматизація системи передбачає використання пристрою інтернету речей з функціями підключення до локальної інформаційно-керуючої мережі, контролем температури та наявності полум'я, а також передачі даних за допомогою промислового протоколу ModBus TCP. Моделювання функціонування системи виконано в середовищі MATLAB Simulink, де реалізовано підсистему адаптивної характеристики, її перетворення у трьохпозиційний керуючий сигнал і динамічну модель поведінки системи вентиляції при змінній концентрації газів. Отримані результати демонструють стабільну роботу вентиляції, ефективне зниження концентрацій вибухонебезпечного газу, а також зменшення енергоспоживання за рахунок оптимізації режимів роботи вентилятора. Запропонована методика дозволяє адаптувати класичні алгоритми керування до умов дискретного режиму роботи виконавчих механізмів, а також інтегрувати вентиляційні підсистеми в сучасну інфраструктуру автоматизованого об'єкта енергетичного комплексу.

Ключові слова: трьохпозиційне дискретне керування; вентиляційна система; вибухонебезпечні гази; метан; водень; газові генератори; акумуляторні зали; ПІД-регулятор; інтернет речей (IoT); автоматизація; MATLAB Simulink; ModBus TCP; енергоефективність; енергетичні підприємства.

Вступ. Забезпечення нормативного рівня якості повітря в приміщеннях енергетичних підприємств, де експлуатуються газове або електрохімічне обладнання, є одним із пріоритетних завдань промислової безпеки, екологічної відповідальності та енергоефективності. Особливої уваги потребують ситуації, пов'язані з можливим витоком метану – у приміщеннях з газогенераторами, та водню – в акумуляторних залах, де він утворюється в процесі заряджання батарей. З огляду на високу вибухонебезпечність цих газів, актуальним є впровадження надійних і технологічно адаптивних вентиляційних систем, здатних не лише оперативно реагувати на зміну параметрів повітряного середовища, а й забезпечувати раціональне використання енергоресурсів.

У сучасних умовах промислової автоматизації спостерігається інтенсивне впровадження систем, що базуються на принципах інтернету речей (IoT), використанні інтелектуальних виконавчих пристроїв та віддаленого серверного керування. Однак, реальні технічні обмеження, такі як використання двигунів із

фіксованими режимами роботи (наприклад, «вимкнено – з'єднання обмоток “зірка” – з'єднання обмоток “трикутник”»), суттєво ускладнюють реалізацію класичних алгоритмів керування, які ґрунтуються на безперервному регулюванні. Це зумовлює потребу в розробці адаптивних підходів до формування керуючих впливів у дискретному режимі.

Одним із перспективних підходів є використання так званих адаптаційних характеристик, що дають змогу реалізувати дискретну апроксимацію опорного алгоритму керування (наприклад, ПІ чи ПІД-регулятора) для систем, в яких можлива лише трьохпозиційна подача керуючої дії. Такий підхід дозволяє зберегти динамічні переваги класичних алгоритмів при обмеженому наборі виконавчих режимів, що особливо важливо для вентиляційних систем із мінімальним енергоспоживанням.

Метою цієї роботи є дослідження та практична реалізація методу використання адаптивної характеристики для забезпечення трьохпозиційного дискретного керування витяжною вентиляцією в

© В. С. Ноздренков, А. В. Павлов, Г. А. Олексієнко, О. Ю. Журавльов, М. І. Коренев, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

окремій зоні промислового приміщення з газовим обладнанням. У дослідженні акцент зроблено на побудові аналітичної моделі об'єкта керування, описі архітектури керувальної системи на базі IoT-рішень та реалізації моделі у середовищі MATLAB Simulink, з подальшим аналізом динаміки системи та ефективності впровадженого алгоритму.

Запропонований підхід дозволяє не лише підвищити енергоефективність та точність регулювання, а й значно спростити серверну реалізацію системи, що є важливим чинником при впровадженні подібних рішень в умовах обмеженого бюджету та ресурсів.

Мета статті. Метою даної наукової статті є розробка, аналітичне обґрунтування та практична реалізація методу використання адаптаційних характеристик у задачі трьохпозиційного дискретного керування витяжною вентиляцією у приміщеннях енергетичних підприємств. Дослідження передбачає формалізацію процесу регулювання концентрації вибухонебезпечних газів, побудову математичної моделі об'єкта керування із врахуванням інерційних властивостей повітряного середовища, а також трансформацію класичного ПД-регулятора до вигляду, що забезпечує ефективну роботу в умовах обмеженого (трьохпозиційного) режиму виконавчого пристрою.

Особливу увагу приділено розробці адаптаційної характеристики, яка дозволяє апроксимувати безперервний регулятор у дискретній реалізації з фіксованими рівнями потужності, що відповідають режимам роботи асинхронного двигуна типу «вимкнено–зірка–трикутник». У роботі також розглядається серверно-клієнтська архітектура реалізації системи на базі IoT-технологій із використанням протоколу Modbus TCP, що забезпечує масштабованість, гнучкість та надійність системи передачі даних.

Застосування створеного методу проілюстровано за допомогою комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink, результати якого дозволяють оцінити динамічні характеристики системи, ефективність перехідних процесів та енергоефективність реалізованого підходу. Отримані результати мають прикладну цінність для впровадження в реальні промислові системи вентиляції, зокрема, в умовах, де техніко-економічні обмеження не дозволяють використовувати складні багатопозиційні або безперервні схеми регулювання.

Огляд літературних джерел. У сучасній науково-технічній літературі значна увага приділяється проблемам контролю якості повітря в робочому середовищі. Основний акцент робиться на виявленні вмісту пилу, диму, шкідливих газів, таких як метан, CO, NO₂, SO₂, та інших, які впливають на безпеку та комфорт перебування людини у приміщенні. Запропоновані підходи охоплюють широкий спектр засобів: від систем фільтрації та вентиляції до зволоження та озонування повітря.

У роботі [1] розроблена система моніторингу та управління в реальному часі, яка керується датчиком та

модулем коротких повідомлень глобальної системи мобільного зв'язку для виявлення викиду горючого газу.

Дослідження [2] присвячене створенню недорогої системи моніторингу якості повітря на основі IoT, як доказ концепції для захоплення та визначення концентрації шкідливих газів у приміщеннях та, залежно від рівня їхньої концентрації, подачі сигналів тривоги та повідомлень, включення вентилятора та/або відкриття дверей.

У роботі [3] представлено розробку та перевірку алгоритму управління, який адаптується до динаміки системи HVAC з використанням вентиляції з управлінням за потребою на основі датчиків. Стратегія управління, заснована на моніторингу та моделюванні концентрації вуглекислого газу (CO₂) у приміщенні, застосовується для реагування на зміни генерації CO₂ у приміщенні за допомогою відповідного регулювання швидкості вентиляції, тобто швидкість вентиляції модулюється з часом на основі сигналів від концентрації CO₂ у приміщенні. Зокрема, у статті основна увага приділяється розробці адаптивної моделі якості повітря в приміщенні на основі прогнозування кількості людей, що знаходяться в приміщенні, в реальному часі для реалізації стратегій управління.

У [4] представлено систему автоматизованого моніторингу якості повітря в приміщенні, якою можна керувати та моніторити за допомогою мобільного телефону, що базується на концепції Інтернету речей. Система періодично контролює стан повітря в приміщенні та може керуватися за допомогою смартфона. Система працює на платформі Інтернету речей, яка забезпечує віддалений доступ через мобільний телефон. Запропонована система контролює рівень CO та CO₂ у приміщенні та повідомляє користувача, якщо він перевищує допустиму межу. Користувач може ввімкнути вентилятор зі смартфона. Ця система була реалізована за допомогою Raspberry Pi, який використовує базу даних для зберігання контрольованих значень та веб-сервер, до якого можна отримати доступ через смартфон.

Систематичний огляд [5] узагальнює сучасні IoT-системи моніторингу повітря: більшість з них зосереджена на контролі теплового комфорту, CO₂ та зважених частинок. Найпоширеніші платформи – Arduino та Raspberry Pi.

У статтях [6–8] акцентовано увагу на віддаленому доступі до даних у реальному часі, використанні хмарних платформ та зменшенні енергоспоживання. У [9, 10] розглянуто технології точного виявлення метану від закритих камер до недисперсійної інфрачервоної спектроскопії.

Інтелектуальне регулювання вентиляції з нечіткою логікою, розглянуте в [11], забезпечує не лише контроль якості повітря, а й оптимізацію енергоспоживання. Аналіз викидів метану в побуті, виконаний у [12], вказує на значні втрати пального у звичайних умовах експлуатації.

У працях [13–15] досліджуються системи виявлення газів на основі мікроконтролерів, що використовують датчики типу MQ та протоколи

бездротового передавання даних. Ці рішення характеризуються доступністю, простотою реалізації та придатністю для широкого кола застосувань.

Разом з тим, більшість наявних рішень орієнтовані переважно на виявлення концентрації газів, а не на ефективне керування вентиляцією в умовах обмеженого (дискретного) режиму роботи виконавчих пристроїв. Метод адаптаційних характеристик, запропонований у [16], дозволяє трансформувати безперервні алгоритми (типу ПД) у форму, придатну для трьохпозиційного керування, що є особливо актуальним у випадках з електроприводами, які працюють за схемою «вимкнено–зірка–трикутник».

Таким чином, потреба у створенні адаптивних, простих і надійних систем дискретного керування вентиляцією залишається актуальною і є предметом подальшого дослідження в цій роботі.

Опис причинно-наслідкових зв'язків в об'єкті керування. У якості об'єкта керування розглянуто окрему зону промислового приміщення (зокрема – приміщення з газовими генераторами або акумуляторну кімнату підстанції), обладнану точковим витяжним вентиляційним пристроєм. Його функціональне призначення полягає у підтриманні допустимого рівня концентрації природного газу CH_4 або водню H_2 шляхом керованого видалення повітряної суміші. У подальшому виклад матеріалу орієнтований на випадок контролю метану, як характерного для приміщень з газогенераторами; усі розрахункові та алгоритмічні рішення залишаються аналогічними для ситуацій із контролем концентрації водню в акумуляторних приміщеннях. Аналіз динаміки цього процесу виконано на основі причинно-наслідкових зв'язків, які візуалізовано на рис. 1 відповідно до методики, запропонованої у [16].

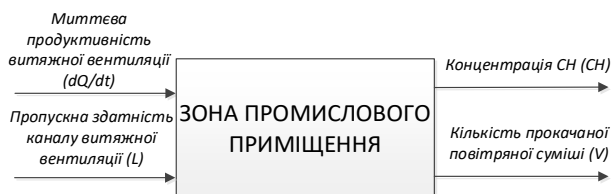


Рисунок 1 – Графічне представлення зони промислового приміщення та його входних і вихідних параметрів

У межах цієї моделі входними параметрами системи виступають миттєва продуктивність витяжної вентиляції dQ/dt та пропускна здатність вентиляційного каналу L . Водночас вихідними параметрами є концентрація метану в повітрі CH_4 і об'єм прокачаної повітряної суміші V .

Для спрощення математичного опису підсистеми приймаються кілька припущень, які дозволяють формалізувати причинно-наслідкові зв'язки між параметрами. Зокрема, вважається, що об'єм повітряної суміші V , необхідний для зниження концентрації метану CH_4 до заданого рівня, є пропорційним миттєвій продуктивності витяжної вентиляції dQ/dt . Крім того, сам процес зміни концентрації газу має інерційний характер і може бути описаний передатною функцією аперіодичної ланки

першого порядку з постійною часу T_R та коефіцієнтом перетворення k_R .

Структурна схема підсистеми вентиляції зони промислового приміщення. Враховуючи наведене вище щодо формалізованого опису процесу керування якістю повітря у зоні приміщення, можна структурно представити відповідну підсистему у вигляді структурної схеми (рис. 2). Головною особливістю практичної реалізації даної системи керування є те, що у якості основного виконуючого пристрою використовується система, побудована на основі асинхронного двигуна змінного струму, швидкість обертання якого підлягає трьохпозиційному регулюванню («вимкнено–трикутник–зірка»), тому відповідне дозування кількості прокачаної повітряної суміші у часі можна реалізувати лише завдяки регламентованому повному включенню приводу (схема з'єднання обмоток «зірка»), переключенню його на схему з'єднання обмоток «трикутник» або повному відключенню відповідного двигуна.



Рисунок 2 – Графічне представлення зони промислового приміщення та його входних і вихідних параметрів

Реалізація автоматичного керування вентиляційною системою здійснюється за допомогою IoT-пристрою, який оснащений низкою інтегрованих функціональних можливостей. Зокрема, пристрій підтримує підключення до локальної мережі приміщення, забезпечує вимірювання температури та виявлення наявності полум'я в зоні розташування, а також виконує релейне керування обмотками асинхронного електродвигуна – з можливістю вмикання, вимикання або перемикання між режимами живлення.

Обмін даними з зовнішнім сервером або сервісною платформою здійснюється за допомогою промислового комунікаційного протоколу Modbus TCP, що забезпечує високу надійність і стандартизовану інтеграцію в системи автоматизації.

Формування керуючого сигналу в системі передбачає використання адаптаційної характеристики, отриманої на основі принципу «ввімкнено–вимкнено» («On–Off»), як проміжного етапу для реалізації трьохпозиційного алгоритму керування. Такий підхід дозволяє врахувати інерційність об'єкта та забезпечити поступовий перехід від класичного двопозиційного регулювання до більш гнучкого трьохпозиційного керування режимами роботи вентиляційної системи. Для подальшого синтезу регулятора передбачається використання адаптаційної характеристики, представленої на рис. 3, з її подальшою інтерпретацією у дискретний тривірневий режим роботи виконавчого механізму, що наведено на рис. 4, відповідно до методичних підходів, запропонованих у [16]. Така

адаптація дозволяє оптимізувати енергоспоживання вентиляційної системи, забезпечити стабільне підтримання заданого рівня концентрації метану у повітряній суміші, а також підвищити загальну ефективність роботи системи.

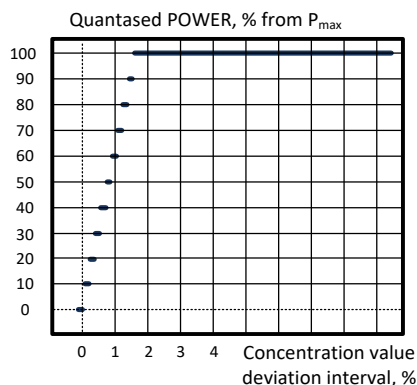


Рисунок 3 – Приклад адаптаційної характеристики для дискретного режиму роботи вентиляції при використанні у якості опорного алгоритму керування ПІД-регулятора з параметрами $P = 12$, $I = 12$, $D = 0.1$, $N = 200$

Цей варіант адаптаційної характеристики є апроксимацією ПІД-алгоритму керування з раніше визначеними параметрами регулятора. Відповідні дискретизовані значення для реалізації трьохпозиційного керування наведено у табл. 1.

Розподіл функцій системи керування у межах зони промислового приміщення здійснено таким чином: програмна частина (Soft) відповідає за адаптацію параметрів і моніторинг на сервері, інтегрованому у спільну локальну мережу, забезпечуючи централізоване управління процесами вентиляції та обробку даних. Безпосереднє вимірювання параметрів реалізується за допомогою спорідненого IoT-блоку на основі газосигналізатора «ВАРТА 2-03А» (виробництва ТОВ «ТЕМІО»), що працює в межах mesh-мережі. Даний блок оснащений додатковим інтерфейсним модулем для зв'язку з системою та обробки отриманих даних у реальному часі, що дозволяє підвищити оперативність реагування на зміну концентрації газу у приміщенні. Такий підхід

забезпечує підвищену гнучкість системи керування, її масштабованість та стійкість до локальних збоїв у мережі.

Таблиця 1 – Апроксимація ПІД - алгоритму

Інтервал відхилень значень концентрації, %	Потужність привода вентиляційної системи, %
0–0.055	0
0.055–0.222	10
0.222–0.381	20
0.381–0.550	30
0.550–0.719	40
0.719–0.888	50
0.888–1.057	60
1.057–1.227	70
1.227–1.396	80
1.396–1.565	90
1.565 та більше	100

Загальний опис роботи системи вентиляції в дискретному (трьохпозиційному) режимі. Для реалізації дозованої прокачки повітряної суміші в системі вентиляції, що функціонує виключно в трьохпозиційному режимі, передбачається використання механізму керування, сформованого на основі адаптаційної характеристики. Режим роботи системи визначається у межах заздалегідь встановленого безпечного інтервалу часу, наприклад 20 хвилин, протягом якого зміна станів вентиляції відбувається лише на його межах, щоб уникнути частих перемикачів, передчасного зношування обладнання та забезпечити необхідну інерційність процесу (рис. 5). Значення потужності, отримані шляхом квантованої інтерпретації адаптаційної характеристики, співвідносяться з режимами роботи асинхронного двигуна: значення в межах 100 % відповідають включенню обмоток у схему «зірка», діапазон 40–90 % – включенню за схемою «трикутник», а нульове значення означає повне відключення двигуна.

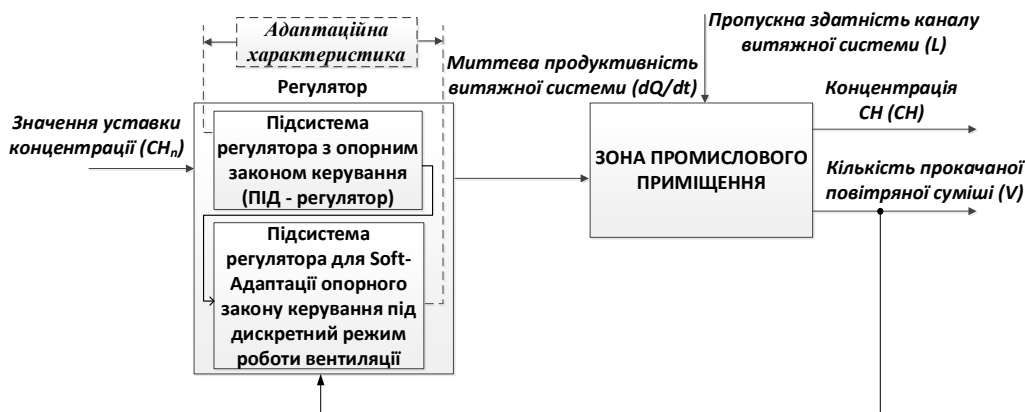


Рисунок 4 – Структурна схема контуру регулювання CH_4 з адаптаційною характеристикою

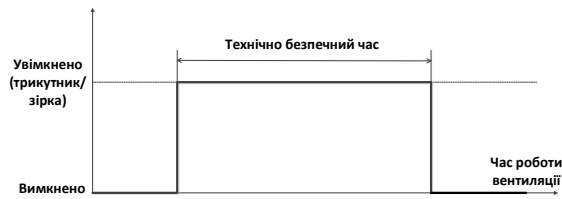


Рисунок 5 – Циклограма безпечної роботи вентиляції у дискретному режимі

Завдяки обмеженню кількості перемикачів та їхній прив'язці до визначених часових інтервалів значно зменшується навантаження на електромеханічні компоненти системи, що сприяє зниженню ризику виникнення аварійних ситуацій, підвищенню надійності роботи обладнання та зменшенню витрат на його технічне обслуговування.

Моделювання процесу керування вентиляцією у зоні промислового приміщення в середовищі MATLAB. Для моделювання процесу керування вентиляцією у вибраній зоні приміщення та подальшого аналізу основних динамічних параметрів у середовищі MATLAB була розроблена та реалізована імітаційна схема, представлена на рис. 6.

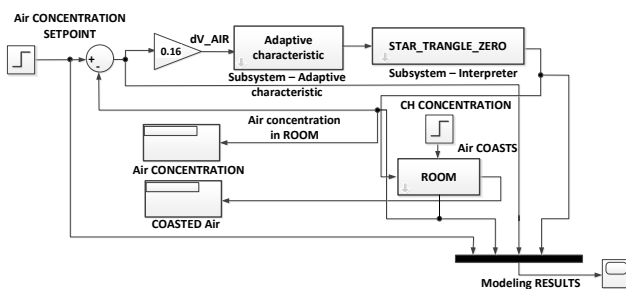


Рисунок 6 – Схема для моделювання процесу керування вентиляцією зони приміщення в середовищі MATLAB

Як видно з рисунка, створена модель містить три основні підсистеми: підсистему приміщення («ROOM»), яка імітує поведінку об'єкта керування, враховуючи інерційність процесу очищення повітря; підсистему адаптивної характеристики («Adaptive characteristic»), що формує необхідний регуляторний вплив на основі заданих параметрів адаптації; а також підсистему інтерпретації цієї характеристики у форматі трьохпозиційного керуючого сигналу («STAR_TRIANGLE_ZERO»), яка відповідає за вибір режиму роботи виконавчого механізму залежно від поточного стану системи. Така побудова моделі забезпечує цілісне відтворення логіки керування та дозволяє дослідити взаємодію підсистем в умовах змін навколишнього середовища.

Для візуалізації результатів моделювання та забезпечення зручного, наочного аналізу поведінки системи вентиляції в реальному часі, у середовищі MATLAB/Simulink використано спеціалізовані допоміжні блоки візуального контролю. Зокрема, реалізовано відображення динаміки зміни концентрації метану у повітрі за допомогою блоку «Air Concentration», що дає змогу в режимі реального часу оцінити ефективність процесу очищення повітря в

контрольованій зоні. Для контролю обсягу прокачаної повітряної суміші використано блок «COASTED AIR», який дозволяє визначити фактичну витрату повітря та її відповідність вимогам до енергоефективності системи. Крім того, ключовим елементом є блок «Modeling Results», який формує графіки перехідних процесів – таких як зміна концентрації газу, динаміка керуючого сигналу та перемикання режимів роботи вентиляційного приводу – що дозволяє наочно проаналізувати ефективність регулювання та виявити потенційні напрями для оптимізації алгоритмів керування.

Приклади отриманих результатів моделювання наведено на рис. 7, де відображено динаміку зміни концентрації повітряної суміші у приміщенні, відхилення керуючого сигналу та роботу інтерпретатора трьохпозиційного регулювання.

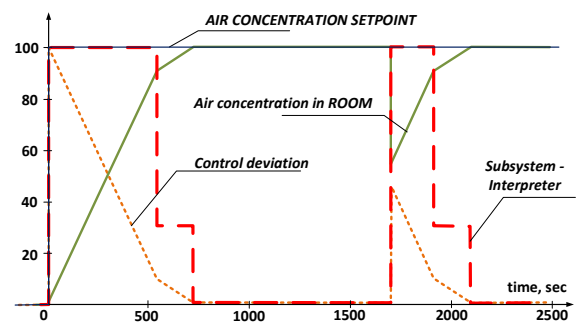


Рисунок 7 – Приклад перехідних процесів в системі при використанні у якості опорного алгоритму керування ПІД-регулятора з параметрами $P = 12$, $I = 12$, $D = 0.1$, $N = 200$ (інтерпретовано з адаптивної характеристики)

Беручи до уваги особливості, враховані під час формалізації приміщення як об'єкта керування, нижче наведено приклади реалізації відповідних підсистем, використаних у моделі для проведення комп'ютерного моделювання. На рис. 8 представлено приклад реалізації підсистеми формування адаптивної характеристики. Її побудова базується на послідовному порівнянні вхідного сигналу із заздалегідь визначеними пороговими значеннями, що задають межі чутливості системи. Кожен блок порівняння генерує відповідний бінарний сигнал, який відображає факт перевищення або недосягнення певного рівня вхідної величини. Далі бінарні сигнали підсумовуються і проходять етап масштабування для приведення отриманого результату до необхідного діапазону значень керуючого сигналу. Після цього результат надходить на комутаційний блок (Switch), який, виходячи з порівняння зі встановленим додатковим порогом, визначає, чи слід активувати виконавчий механізм у відповідному режимі. Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивну реакцію системи на зміну вхідного сигналу з урахуванням визначеної порогової чутливості, забезпечуючи гнучкість налаштувань та підвищену стійкість роботи навіть за умов зовнішніх збурень або нестабільних процесів у робочому середовищі.

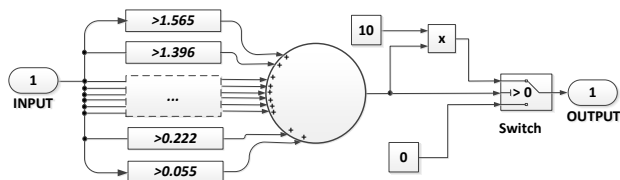


Рисунок 8 – Приклад реалізації підсистеми адаптивної характеристики («Adaptive characteristic»)

Подальше моделювання процесу вентиляції, як об'єкта керування, подано на рис. 9. У цій підсистемі реалізовано динамічну модель приміщення, яка враховує зміну концентрації метану в повітрі залежно від наявної витяжної потужності системи вентиляції. Модель включає інерційні властивості об'єкта, що дозволяє відобразити часові затримки у зміні концентрації газу при зміні умов вентиляції. Передбачено також можливість оцінки витрати повітря через вентиляційний канал та реакції концентрації у часі, що дає змогу не лише аналізувати миттєві стани системи, а й відтворювати реальні фізичні процеси очищення повітря в динаміці. Такий підхід до моделювання забезпечує адекватність отриманих результатів, дозволяє оцінювати ефективність різних стратегій керування і сприяє подальшій оптимізації режимів роботи вентиляційної системи для промислових приміщень із ризиком накопичення горючих газів.

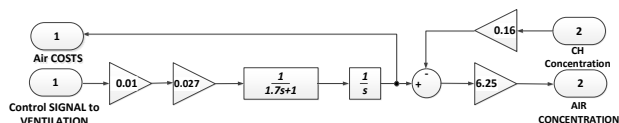


Рисунок 9 – Приклад реалізації підсистеми приміщення («ROOM»)

З метою узгодження вихідного сигналу адаптивної характеристики із дискретною логікою трьохпозиційного керування, реалізовано підсистему інтерпретації, яка представлена на рис. 10. Вона здійснює порогову обробку адаптивного сигналу, розділяючи його на три діапазони відповідно до режимів роботи електродвигуна: повне вимкнення, режим зниженої потужності та повне навантаження. Такий підхід дозволяє поєднати плавну логіку регулювання з апаратною реалізацією у вигляді трипозиційного виконавчого механізму.

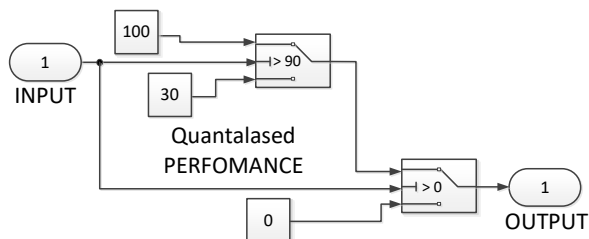


Рисунок 10 – Приклад реалізації підсистеми інтерпретації адаптивної характеристики в трьохпозиційний сигнал керування («STAR_TRIANGLE_ZERO»)

Основні висновки за результатами моделювання процесу керування концентрацією повітря у промисловому приміщенні в середовищі MATLAB. На основі моделі та методики, запропонованої у роботі [16] і адаптованої до задачі автоматизованого керування вентиляцією в приміщеннях енергетичних підприємств із ризиком накопичення вибухонебезпечних газів, було виконано серію аналітичних експериментів шляхом комп'ютерного моделювання в середовищі MATLAB Simulink. Представлені результати демонструють ключові принципи побудови системи витяжної вентиляції з урахуванням особливостей трьохпозиційного регулювання потужності асинхронного електроприводу, орієнтованого на стабілізацію концентрації метану у повітряній суміші. Для випадку контролю водню в акумуляторних залах розрахункова схема та алгоритм залишаються аналогічними.

Аналіз практичних результатів показав, що використання ПІ або ПІД-закону регулювання у системах вентиляції з дискретним режимом роботи забезпечує стійкий і швидкий перехідний процес за концентрацією газу у повітряній суміші без порушення нормативних вимог. Параметри якості переходу, отримані в ході моделювання, продемонстрували відповідність загальноприйнятим технічним критеріям: статична похибка залишалася менше 1 %, а коливальні явища були відсутні, що наближало динаміку поведінки системи до аперіодичної ланки другого порядку.

Крім того, результати моделювання засвідчили, що мінімізація енергетичних витрат на прокачування повітряної суміші без погіршення якості регулювання і стійкості системи можлива шляхом застосування пропорційно-інтегрального або пропорційно-інтегрально-диференційного закону регулювання з мінімальним впливом диференційної складової, який становить лише долі відсотка від інтегральної складової.

Окрему увагу приділено оцінці ефективності адаптаційної характеристики, яка була використана для трансформації класичного регулятора у дискретну форму. Отримані результати підтвердили, що побудова адаптаційної характеристики значно спрощує реалізацію регулювання на виконавчих пристроях типу «On/Off» з подальшим переходом до трьохпозиційної логіки.

Подальший аналіз підтвердив також ефективність застосування серверної архітектури типу «сервер – виконавчий пристрій зі зворотним зв'язком через спільну інформаційно-керуючу мережу», що дозволяє оптимізувати процес налаштування, моніторингу та передачі даних у системі за умови використання надійних промислових протоколів обміну.

Висновки. Проведення дослідження дозволяє зробити ряд аналітичних та практичних висновків, які мають значення для розробки, впровадження і налаштування аналогічних систем та підсистем автоматичного регулювання.

Організація системи керування на основі спільної локальної інформаційно-керуючої мережі з використанням надійних інтерфейсів і стандартних протоколів значно спрощує архітектуру системи без втрати її функціональності та підвищує гнучкість її масштабування і резервування. Спрощення фізичної інфраструктури, у тому числі трасувань і підсистем живлення, забезпечує додаткові економічні переваги на етапах проектування і впровадження.

Інтеграція доступних елементів, таких як стандартні датчики, мікроконтролери та відкриті середовища розробки, сприяє істотному зниженню вартості створення, розгортання і подальшого обслуговування системи, що робить її економічно привабливою для впровадження у промислових умовах. Використання компонентів із відкритими специфікаціями також забезпечує більшу гнучкість у процесі модернізації та масштабування системи під конкретні вимоги об'єкта. Включення IoT-технологій і технологій промислового інтернету речей (IIoT) додатково спрощує інтеграцію системи у глобальні інформаційні екосистеми, забезпечуючи можливість її віддаленого моніторингу, керування та оперативного налаштування. Завдяки такому підходу відкриваються нові можливості застосування туманних (fog computing) та хмарних обчислень (cloud computing) для обробки даних і підвищення загальної якості процесів керування, що є особливо важливим для об'єктів із високими вимогами до надійності, безпеки та енергоефективності.

Використання web-технологій для налаштування, адміністрування та моніторингу сприяє підвищенню ефективності експлуатації системи на базі mesh-мереж. Мультипротокольна підтримка при грамотному проектуванні дозволяє синергетично поєднувати різні канали обміну даними для підвищення надійності і продуктивності керуючих процесів.

Особливу увагу слід приділяти вибору апаратної основи для IoT- і IIoT-систем — застосування мікроконтролерів сімейства ESP виробництва Espressif Systems дозволяє суттєво знизити витрати та спростити як розгортання, так і подальшу підтримку системи.

У цілому результати проведеного дослідження підтверджують ефективність запропонованої методики побудови дискретних систем керування вентиляційними процесами на основі адаптаційної характеристики, зокрема для задач контролю концентрації вибухонебезпечних газів — таких як метан у приміщеннях із газогенераторами та водень в акумуляторних залах. Також обґрунтовано доцільність впровадження гнучкої та масштабованої архітектури керування з використанням сучасних інформаційних технологій і IoT-пристроїв, що забезпечують інтеграцію системи в локальні мережі керування та моніторингу.

Список літератури

1. Design of monitoring and control system for indoor flammable gas / R. Zhao et al. 2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018), Jinan, China,

- 2–3 June 2018. Paris, France, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2991/icmmct-18.2018.15>.
2. Development and assessment of an indoor air quality control IoT-based system / G. Guerrero-Ulloa et al. *Electronics*. 2023. Vol. 12, no. 3. 608. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12030608>.
3. Li J., Wall J., Platt G. Indoor air quality control of HVAC system. *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Okayama, Japan. P. 756–761.
4. Mukesh D. M., Akula S. K. Automated indoor air quality monitor and control. *International Journal of Computer Applications*. 2017. Vol. 159, no. 6. P. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.5120/ijca2017912968>.
5. Saini J., Dutta M., Marques G. Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2020. Vol. 17, no. 14. 4942. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>.
6. Biswal A., Subhashini J., Pasayat A. K. Air quality monitoring system for indoor environments using IoT. *The 11th National Conference on Mathematical Techniques and Applications*, Chennai, India, 11–12 January 2019. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5112365>.
7. IoT based indoor air quality monitoring system using Raspberry Pi4 / S. Faiazuddin et al. 2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 5–7 November 2020. P. 714–719. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297442>.
8. IOT based – automated indoor air quality and LPG leak detection control system using support vector machine / P. R. Meris et al. 2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, Malaysia, 8 August 2020. P. 231–235. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsgrc49013.2020.9232472>.
9. Nicholas D., Ackley R., Phillips N. G. A simple method to measure methane emissions from indoor gas leaks. *PLOS ONE*. 2023. Vol. 18, no. 11. e0295055. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295055>.
10. A portable device for methane measurement using a low-cost semiconductor sensor: development, calibration and environmental applications / L. Furst et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 22. 7456. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21227456>.
11. Bushnag A. Air quality and climate control arduino monitoring system using fuzzy logic for indoor environments. 2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD), Paris, France, 7–9 October 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/iccad49821.2020.9260514>.
12. Merrin Z., Francisco P. W. Unburned methane emissions from residential natural gas appliances. *Environmental Science & Technology*. 2019. Vol. 53, no. 9. P. 5473–5482. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05323>.
13. Бондаренко М. О., Гурін М. П., Ніконова З. А. Розробка дистанційного аналізатора повітря. *The 11th International scientific and practical conference "Modern research in world science"*, Lviv, Ukraine, 29–31 January 2023. P. 347–351. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.01.23.pdf>.
14. Design and evaluation of a low-cost sensor node for near-background methane measurement / D. Furuta et al. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2024. Vol. 17, no. 7. P. 2103–2121. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-17-2103-2024>.
15. Karamchandani S., Gonsalves A., Gupta D. Pervasive monitoring of carbon monoxide and methane using air quality prediction. 2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom), New Delhi, India, 16–18 March 2016. P. 2498–2502.
16. Програмна адаптація опорного алгоритму для дискретного регулювання / В. С. Ноздренков та ін. *Проблеми інформатизації та управління*. 2024. Т. 2, № 78. С. 52–60. DOI: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18961>.

References (transliterated)

1. R. Zhao, L. Ma, H. Wei, and G. Pang, "Design of monitoring and control system for indoor flammable gas", in *2018 6th International Conference on Machinery, Materials and Computing Technology (ICMMCT 2018)*, Jinan, China, Jun. 2–3, 2018. Paris, France: Atlantis Press, 2018, doi: <https://doi.org/10.2991/icmmct-18.2018.15>
2. G. Guerrero-Ulloa, A. Andrago-Catota, M. Abad-Alay, M. J. Hornos, and C. Rodríguez-Domínguez, "Development and

- assessment of an indoor air quality control IoT-based system”, *Electronics*, vol. 12, no. 3, Jan. 2023, Art. no. 608, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12030608>
3. J. Li, J. Wall, and G. Platt, “Indoor air quality control of HVAC system”, in *Proceedings of the 2010 International Conference on Modelling, Identification and Control*, Okayama, Japan, Japan. n.d., pp. 756–761.
 4. D. M. Mukesh and S. K. Akula, “Automated indoor air quality monitor and control”, *International Journal of Computer Applications*, vol. 159, no. 6, pp. 33–38, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.5120/ijca2017912968>
 5. J. Saini, M. Dutta, and G. Marques, “Indoor air quality monitoring systems based on internet of things: A systematic review”, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no. 14, Jul. 2020, Art. no. 4942, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph17144942>
 6. A. Biswal, J. Subhashini, and A. K. Pasayat, “Air quality monitoring system for indoor environments using IoT”, in *The 11th National Conference on Mathematical Techniques and Applications*, Chennai, India, Jan. 11–12, 2019. AIP Publ., 2019, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5112365>
 7. S. Faiazuddin, M. V. Lakshmaiah, K. T. Alam, and M. Ravikiran, “IoT based indoor air quality monitoring system using Raspberry Pi4”, in *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, Nov. 5–7, 2020, pp. 714–719, doi: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297442>
 8. P. R. Meris *et al.*, “IoT based – automated indoor air quality and LPG leak detection control system using support vector machine”, in *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)*, Shah Alam, Malaysia, Aug. 8, 2020, pp. 231–235, doi: <https://doi.org/10.1109/icsgrc49013.2020.9232472>
 9. D. Nicholas, R. Ackley, and N. G. Phillips, “A simple method to measure methane emissions from indoor gas leaks”, *PLOS ONE*, vol. 18, no. 11, Nov. 2023, Art. no. e0295055, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0295055>
 10. L. Furst, M. Feliciano, L. Frare, and G. Igrejas, “A portable device for methane measurement using a low-cost semiconductor sensor: Development, calibration and environmental applications”, *Sensors*, vol. 21, no. 22, Nov. 2021, Art. no. 7456, doi: <https://doi.org/10.3390/s21227456>
 11. A. Bushnag, “Air quality and climate control arduino monitoring system using fuzzy logic for indoor environments”, in *2020 International Conference on Control, Automation and Diagnosis (ICCAD)*, Paris, France, Oct. 7–9, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/iccad49821.2020.9260514>
 12. Z. Merrin and P. W. Francisco, “Unburned methane emissions from residential natural gas appliances”, *Environmental Science & Technology*, vol. 53, no. 9, pp. 5473–5482, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b05323>
 13. M. O. Bondarenko, M. R. Hurin, and Z. A. Nikonova, “Rozrobka dystantsiinoho analizatora povitria [Development of a remote air analyser]”, in *The 11th International Scientific and Practical Conference “Modern Research in World Science”*, Lviv, Ukraine, Jan. 29–31, 2023, pp. 347–351, doi: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2023/02/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-29-31.01.23.pdf> (in Ukrainian)
 14. D. Furuta, B. Wilson, A. A. Presto, and J. Li, “Design and evaluation of a low-cost sensor node for near-background methane measurement”, *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 17, no. 7, pp. 2103–2121, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.5194/amt-17-2103-2024>
 15. S. Karamchandani, A. Gonsalves, and D. Gupta, “Pervasive monitoring of carbon monoxide and methane using air quality prediction”, in *2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*, New Delhi, India, Mar. 16–18, 2016, pp. 2498–2502.
 16. V. S. Nozdrenkov, A. V. Pavlov, G. A. Oleksienko, O. Y. Zhuravlov, and Y. O. Zhuravlov, “Soft-adaptation of reference algorithm for discrete control”, *Problems of Informatization and Management*, vol. 2, no. 78, pp. 52–60, Jul. 2024, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.78.18961> (in Ukrainian)

Надійшла (received) 12.05.2025

UDC 681.518:004.942

NOZDRENKOV VALERII ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Postdoctoral Researcher at the Department of Computer Science and Systems Analysis, Cherkasy State Technological University; Cherkasy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-0579-6821>; e-mail: v.s.nozdrenkov.d24@chdtu.edu.ua.

PAVLOV ANDRII – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Computerized Control Systems; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8861-8472>; e-mail: a.pavlov@ksu.sumdu.edu.ua.

OLEKSIENKO GALYNA – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Computer Science; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0274-5095>; e-mail: galyana2@ukr.net.

ZHURAVLOV OLEKSANDR – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Senior Lecturer of the Department of Computerized Control Systems; Sumy State University; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7834-6661>; e-mail: san.75@i.ua.

KORENEV MYKOLA – Software Engineer, “NETCRACKER LLC”; Sumy, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6929-7281>; e-mail: nikolaj.korenev99@gmail.com.

ADAPTIVE THREE-POSITION CONTROL OF VENTILATION IN POWER FACILITY PREMISES WITH THE RISK OF ACCUMULATING EXPLOSIVE GASES

The article presents a methodology for three-position discrete control of ventilation systems in the premises of energy enterprises with an increased risk of forming explosive gas environments. The focus is on two typical sources of hazardous gas accumulation: methane, released in rooms with gas-fueled power generator units, and hydrogen, generated while charging lead-acid batteries in accumulator rooms. The proposed approach enables the transition from two-position (“On-Off”) control to a three-position ventilation drive control mode using an adaptive characteristic derived from a PID controller with predefined parameters. The control is implemented through an asynchronous electric motor with a “star–delta–off” switching scheme, allowing the exhaust ventilation operation mode to adjust automatically. The automation of the system is based on an IoT device that supports integration into a local information-control network, measures temperature and flame presence, and transmits data via the industrial ModBus TCP protocol. System operation modelling was performed in MATLAB Simulink, including implementing the adaptive characteristic subsystem, its conversion into a three-position control signal, and a dynamic model of ventilation behaviour under varying gas concentrations. The results confirm the stable operation of the ventilation system, effective reduction in methane and hydrogen concentrations, and decreased energy consumption through optimized fan control. The proposed methodology allows classical control algorithms to be adapted for discrete actuator operation and enables seamless integration of ventilation subsystems into modern automated energy infrastructure.

Keywords: three-position discrete control; ventilation system; explosive gases; methane; hydrogen; gas generators; battery rooms; PID controller; Internet of Things (IoT); automation; MATLAB Simulink; ModBus TCP; energy efficiency; energy facilities.