

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально–науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно–інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)

Розроблення системи автоматизації енергозберігаючого регулювання для  
промислового обладнання

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання

групи КІТПВзм–24–1

Божинський Сергій Володимирович

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ю–  
терно–інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Комп'ютерно–інтегровані  
технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо–професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Омаров М.А.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально–науковий центр заочної форми навчання

Кафедра	Комп'ютерно–інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація та комп'ютерно–інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо–професійна
Освітня програма	Комп'ютерно–інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Божинському Сергію Володимировичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

- Тема роботи: Розроблення системи автоматизації енергозберігаючого регулювання для промислового обладнання  
затверджена наказом по університету від \_\_\_\_\_ 11.03.2025 №192Стз
- Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 30.12.2025
- Вихідні дані до роботи: Дані про системи автоматизації енергозберігаючого регулювання для промислового обладнання.
- Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:
  - Теоретичні основи енергозберігаючого регулювання промислового обладнання;
  - Розроблення системи автоматизації енергозберігаючого регулювання;
  - Експериментальні дослідження та оцінка ефективності роботи системи.
- Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint  
*Демонстраційний матеріал представлений у форматі PowerPoint (\*.ppt) – 12с.*

формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Теоретичні основи енергозберігаючого регулювання промислового обладнання	20.10.2025	виконано
2	Розроблення системи автоматизації енергозберігаючого регулювання	30.10.2025	виконано
3	Експериментальні дослідження та оцінка ефективності роботи системи	05.11.2025	виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	20.11.2025	виконано
5	Подання роботи на перевірку академічної доброчесності	22.11.2025	виконано
6	Подання у ЕК	25.11.2025	виконано

Дата видачі завдання 27.08.2025

Здобувач  
\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. Омаров М.А.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

Я, Божинський Сергій Володимирович, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Дата: 25.11.2025



## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 68 с., 2 табл., 6 рис., 2 дод., 26 джерел.

АВТОМАТИЗОВАНЕ РЕГУЛЮВАННЯ, ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА, АДАПТИВНЕ КЕРУВАННЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, СТРУКТУРНА СХЕМА, АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ, АРДУІНО-МОДУЛЬ.

Об'єкт дослідження – процес автоматизованого регулювання енергоспоживання промислового обладнання.

Предмет дослідження – система автоматизації енергозберігаючого регулювання технологічних процесів.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – розроблення ефективної системи автоматизації енергозберігаючого регулювання промислового обладнання з використанням сучасних засобів вимірювання, контролю та керування.

Методи дослідження – методи системного аналізу, математичного моделювання, методи оптимізації енергоспоживання, аналіз динамічних характеристик систем, а також метод комп'ютерного моделювання з використанням програмного забезпечення MATLAB/Simulink та Proteus.

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз існуючих систем енергозбереження в промисловості та визначено їх основні недоліки. На основі цього розроблено концепцію автоматизованої системи енергозберігаючого регулювання, що забезпечує зменшення витрат електроенергії шляхом адаптивного керування режимами роботи обладнання.

Для досягнення поставленої мети виконано математичне та комп'ютерне моделювання процесів регулювання. Розроблено структурну та функціональну схеми системи, алгоритм керування та модуль збору даних на базі мікроконтролера Arduino. Проведено дослідження впливу зміни основних параметрів системи –

коефіцієнтів регулювання, затримки сигналів та порогових значень датчиків – на енергоспоживання та стабільність роботи обладнання.

На основі отриманих результатів побудовано математичну модель системи енергозберігаючого регулювання, проведено її ідентифікацію та оптимізацію параметрів для підвищення ефективності. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення існуючих систем керування промисловими процесами з метою зниження енерговитрат і підвищення надійності роботи обладнання.

## **ABSTRACT**

Explanatory note: 68 pp., 2 tab., 6 figures., 2 app., 26 sources.

AUTOMATED CONTROL, ENERGY CONSUMPTION, ENERGY-SAVING SYSTEM, ADAPTIVE CONTROL, TECHNOLOGICAL PROCESS, MATHEMATICAL MODELING, COMPUTER MODELING, BLOCK DIAGRAM, CONTROL ALGORITHM, ARDUINO MODULE

Object of research – the process of automated regulation of energy consumption of industrial equipment.

Subject of research – the automation system for energy-saving regulation of technological processes.

Purpose of the master's qualification work – the development of an efficient automation system for energy-saving regulation of industrial equipment using modern measurement, monitoring, and control tools.

Research methods – methods of system analysis, mathematical modeling, energy consumption optimization methods, analysis of dynamic system characteristics, as well as computer modeling using MATLAB/Simulink and Proteus software.

The qualification work includes an analysis of existing energy-saving systems in industry and identifies their main shortcomings. Based on this, a concept of an automated energy-saving regulation system has been developed, which provides a reduction in electricity consumption through adaptive control of equipment operating modes.

To achieve the stated goal, mathematical and computer modeling of regulation processes was performed. The structural and functional diagrams of the system, the control algorithm, and a data acquisition module based on an Arduino microcontroller were developed. A study was conducted on the influence of changes in key system parameters—control coefficients, signal delays, and sensor threshold values—on energy consumption and the stability of equipment operation.

Based on the obtained results, a mathematical model of the energy-saving regulation system was built, followed by its identification and parameter optimization to improve efficiency. The obtained results can be used to enhance existing control systems of industrial processes in order to reduce energy consumption and increase equipment reliability.

## ЗМІСТ

Перелік скорочень .....	11
Вступ.....	12
1 Теоретичні основи енергозберігаючого регулювання промислового обладнання.....	14
1.1 Поняття автоматизованих систем керування технологічними процесами...14	
1.2 Основи енергозбереження в промислових системах .....	17
1.3 Методи регулювання енергоспоживання: частотне керування, оптимізація режимів, датчики контролю .....	21
1.4 Аналіз існуючих рішень з енергозберігаючої автоматизації.....	24
1.5 Висновки до першого розділу.....	27
2 Розроблення системи автоматизації енергозберігаючого регулювання.....	29
2.1 Вибір об'єкта автоматизації .....	29
2.2 Розроблення структурної схеми системи керування.....	32
2.3 Вибір технічних засобів.....	36
2.4 Системи та принципи енергозберігаючого регулювання.....	40
2.5 Моделювання системи в середовищі .....	43
2.6 Висновки до другого розділу.....	45
3 Експериментальні дослідження та оцінка ефективності роботи системи .....	46
3.1 Методика проведення експериментальних досліджень.....	46
3.2 Результати експериментальних досліджень (порівняння характеристик системи «до» і «після» впровадження) .....	50
3.3 Аналіз отриманих результатів і підтвердження ефективності енергозберігаючого регулювання.....	53
3.4 Оцінка надійності, стабільності та точності регулювання .....	56
3.5 Заходи з охорони праці при розробленні та експлуатації системи автоматизації.....	59
3.6 Висновки до третього розділу.....	62
Висновки.....	63
Перелік джерел посилання .....	66

Додаток А Публікація за тематикою роботи.....	69
Додаток Б Демонстраційний матеріал.....	77

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АСКТП – автоматизована система керування технологічними процесами;

АСЗ – аварійна система захисту;

ДСТУ – Український державний стандарт;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

ЧРЕП – частотно-регульований електропривід;

BMS – система керування будівлею;

DCS – розподілена система керування;

ISO – Міжнародна організація зі стандартизації.

SCADA – диспетчерське керування та збір даних;

SQL – Мова структурованих запитів;

## ВСТУП

Сучасний етап розвитку промисловості характеризується зростанням потреби у підвищенні енергоефективності технологічних процесів, що обумовлює необхідність упровадження систем автоматизації, здатних забезпечувати оптимальне використання енергетичних ресурсів без зниження продуктивності обладнання. Зростання цін на енергоносії, глобальні екологічні виклики та вимоги до зниження викидів парникових газів зумовлюють актуальність розроблення енергозберігаючих технологій і впровадження автоматизованих систем керування, спрямованих на мінімізацію втрат енергії під час експлуатації промислових установок.

У промислових підприємствах значна частка витрат енергії припадає на технологічне обладнання, ефективність роботи якого визначається режимами навантаження, станом виконавчих механізмів, характеристиками керуючих пристроїв і правильністю вибору алгоритмів регулювання. Застосування традиційних систем управління, що працюють у фіксованих режимах, призводить до нерационального використання енергії, надлишкового споживання електроенергії, зниження ресурсу обладнання та підвищення експлуатаційних витрат. Тому автоматизація процесів регулювання з урахуванням енергозберігаючих принципів набуває стратегічного значення для розвитку сучасного промислового виробництва.

Система автоматизації енергозберігаючого регулювання розглядається як комплекс технічних, програмних та інформаційних засобів, який забезпечує безперервний моніторинг параметрів енергоспоживання, аналіз стану технологічного процесу та адаптивне коригування режимів роботи обладнання відповідно до зовнішніх і внутрішніх умов. Така система дозволяє не лише знизити рівень енергетичних витрат, але й підвищити точність, стабільність та надійність функціонування технологічних процесів.

В умовах цифровізації промисловості особливого значення набуває

використання інтелектуальних засобів вимірювання та керування, таких як мікроконтролерні платформи, сенсорні модулі та програмно-апаратні комплекси, здатні забезпечувати обробку великих обсягів даних у режимі реального часу. Використання програмного забезпечення MATLAB/Simulink, Proteus, LabVIEW та подібних інструментів відкриває широкі можливості для математичного моделювання, дослідження динаміки системи, аналізу її стійкості та оптимізації параметрів регулювання.

Енергозберігаюче регулювання у промислових системах передбачає реалізацію комплексного підходу, який поєднує технічні, математичні та програмні рішення. Розроблення математичних моделей дозволяє описувати взаємозв'язки між змінними процесу, визначати оптимальні режими функціонування, прогнозувати реакцію системи на зовнішні впливи та підвищувати ефективність прийняття керуючих рішень. У поєднанні з алгоритмами адаптивного керування такі моделі створюють основу для побудови систем, здатних автоматично підтримувати баланс між енергоефективністю та продуктивністю обладнання.

# 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО РЕГУЛЮВАННЯ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

## 1.1 Поняття автоматизованих систем керування технологічними процесами

Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСКТП) являють собою складні технічні комплекси, які забезпечують контроль, регулювання та оптимізацію параметрів технологічних процесів з метою підвищення ефективності виробництва, зменшення витрат енергетичних ресурсів, підвищення якості продукції та стабільності роботи обладнання. Формування таких систем базується на принципах кібернетики, теорії автоматичного регулювання, системного аналізу та інформаційних технологій, що у сукупності дозволяє створювати інтегровані рішення для управління промисловими процесами будь-якої складності.

АСКТП функціонує як багаторівнева структура, у якій здійснюється взаємодія між апаратними та програмними компонентами, об'єднаними єдиним алгоритмом управління. На нижньому рівні розміщується первинне обладнання – датчики, виконавчі механізми, контролери, які забезпечують збір, передавання та реалізацію сигналів. Середній рівень охоплює програмно-апаратні комплекси, що виконують локальне управління окремими ділянками технологічного процесу. На верхньому рівні реалізується централізоване керування та моніторинг, здійснюється аналітична обробка даних, формування звітів, візуалізація параметрів і прийняття рішень щодо оптимізації режимів роботи обладнання [9].

Основною функцією АСКТП є забезпечення автоматичного регулювання змінних технологічного процесу, таких як температура, тиск, витрата, рівень, швидкість обертання, електричне навантаження тощо, у межах заданих оптимальних значень. Для цього застосовуються контури зворотного зв'язку, які дають змогу порівнювати фактичні параметри процесу з еталонними і вносити коригувальні впливи через виконавчі механізми. Таке регулювання дозволяє

підтримувати стабільність процесів навіть за наявності зовнішніх збурень, зміни навантаження або коливань енергопостачання, що особливо важливо для промислового обладнання з підвищеними вимогами до точності та безперервності роботи.

Структура автоматизованих систем керування визначається характером технологічного процесу та вимогами до точності регулювання. У загальному випадку вона включає інформаційно-вимірювальні підсистеми, контролери, програмні модулі, засоби комунікації, бази даних та інтерфейси оператора. Інформаційно-вимірювальна підсистема здійснює безперервний моніторинг стану процесу за допомогою датчиків тиску, температури, витрати, вологості, струму або напруги. Контролери виконують обчислення у режимі реального часу, аналізують отримані дані, формують керуючі дії та забезпечують їх реалізацію через виконавчі механізми, зокрема електроприводи, клапани або регулятори потоку.

Застосування сучасних програмованих логічних контролерів (PLC), мікроконтролерів та вбудованих систем дозволяє підвищувати гнучкість, точність і швидкодію керування, що робить можливим створення адаптивних і самоналагоджувальних систем. Використання комунікаційних протоколів, таких як Modbus, Profibus, Ethernet/IP, забезпечує інтеграцію окремих елементів у єдину інформаційну мережу, яка дозволяє централізовано контролювати параметри процесу та оперативно реагувати на відхилення [10].

Автоматизовані системи керування технологічними процесами базуються на використанні алгоритмів, які визначають логіку функціонування системи в умовах змінних технологічних параметрів. Такі алгоритми можуть бути реалізовані на основі класичних принципів регулювання (П-, ПІ-, ПІД-регулятори), а також сучасних підходів, що включають нечітку логіку, нейронні мережі та адаптивне управління. Використання інтелектуальних методів дає змогу підвищувати ефективність керування, забезпечувати самонавчання системи та підлаштування під зміну зовнішніх умов без втручання оператора.

У контексті енергозберігаючого регулювання особливе значення набуває інтеграція енергетичних параметрів у систему автоматичного управління, що

дозволяє реалізовувати керування не лише за технологічними, але й за енергетичними критеріями. Це передбачає введення у систему додаткових модулів моніторингу споживаної потужності, обліку енергетичних втрат, а також блоків оптимізації, які визначають найраціональніші режими роботи обладнання. Внаслідок цього досягається зниження споживання енергії без втрати продуктивності, збільшується термін служби технічних засобів та зменшуються експлуатаційні витрати.

Автоматизовані системи керування у сучасних умовах розвиваються у напрямі цифровізації та інтелектуалізації, що проявляється у широкому застосуванні технологій Інтернету речей (IoT), штучного інтелекту (AI) та машинного навчання (ML). Завдяки цим технологіям здійснюється обмін даними між обладнанням, прогнозування технічного стану агрегатів, виявлення аномалій у роботі системи, а також автоматична оптимізація параметрів у реальному часі. Таким чином, АСКТП перетворюється на складну кіберфізичну систему, у якій фізичні процеси тісно інтегровані з цифровими моделями, що дає змогу забезпечувати високий рівень ефективності та надійності виробництва [11].

Особливу роль у структурі таких систем відіграє людино-машинний інтерфейс (HMI), який забезпечує взаємодію оператора з технічними засобами керування, візуалізацію даних, індикацію стану системи та формування команд керування. Застосування інтуїтивно зрозумілих графічних інтерфейсів з елементами аналітики дозволяє підвищувати якість прийняття рішень, скорочувати час реакції на відхилення та забезпечувати гнучке налаштування технологічних параметрів.

Отже, автоматизовані системи керування технологічними процесами становлять основу сучасного енергозберігаючого виробництва, забезпечуючи взаємопов'язане функціонування обладнання, інформаційних технологій і математичних алгоритмів. Реалізація таких систем сприяє досягненню високих показників енергоефективності, підвищенню рівня автоматизації, стабільності технологічних процесів і конкурентоспроможності промислових підприємств у сучасних умовах індустріального розвитку.

## 1.2 Основи енергозбереження в промислових системах

Енергозбереження в промислових системах розглядається як комплекс технічних, організаційних, технологічних і управлінських заходів, спрямованих на раціональне використання енергетичних ресурсів, мінімізацію втрат енергії на всіх етапах виробничого процесу та підвищення ефективності функціонування технологічного обладнання. У сучасних умовах енергозбереження виступає одним із ключових напрямів розвитку промисловості, оскільки воно безпосередньо впливає на економічну стабільність підприємств, екологічну безпеку виробництва та конкурентоспроможність продукції на ринку.

Основою енергозбереження є принцип раціонального енергоспоживання, який передбачає не лише зменшення абсолютних обсягів використання енергії, але й підвищення ефективності її перетворення, передачі та споживання. Цей принцип реалізується через впровадження систем моніторингу енергетичних потоків, автоматизацію регулювання технологічних процесів, використання сучасних засобів вимірювання та контролю, а також застосування алгоритмів, орієнтованих на мінімізацію енергетичних витрат за умови забезпечення стабільності технологічних параметрів [12].

Енергозберігаюча концепція у промисловості ґрунтується на комплексному підході, який охоплює три основні складові: енергетичний аудит, оптимізацію технологічних процесів і впровадження інноваційних систем керування. Енергетичний аудит передбачає систематичний аналіз стану енергоспоживання підприємства, визначення точок надмірних втрат, виявлення нераціонального використання енергії та формування рекомендацій щодо підвищення ефективності. На основі отриманих даних виконується моделювання технологічних процесів, що дозволяє оцінювати потенціал енергозбереження, прогнозувати ефект від реалізації конкретних заходів та визначати доцільність впровадження тих чи інших технічних рішень.

Важливою складовою енергозбереження є підвищення ефективності роботи

електроприводів, насосів, компресорів, теплових машин та іншого технологічного обладнання, яке становить найбільшу частку енергоспоживання у промисловості. Реалізація цього напрямку досягається за рахунок застосування частотного регулювання електродвигунів, впровадження автоматизованих систем керування приводами, використання енергозберігаючих матеріалів і вдосконалення систем мастила, охолодження та теплообміну [13]. Частотне регулювання дозволяє змінювати швидкість обертання двигуна відповідно до реального навантаження, що значно знижує споживання електроенергії, усуває пікові навантаження на мережу та продовжує термін служби обладнання.

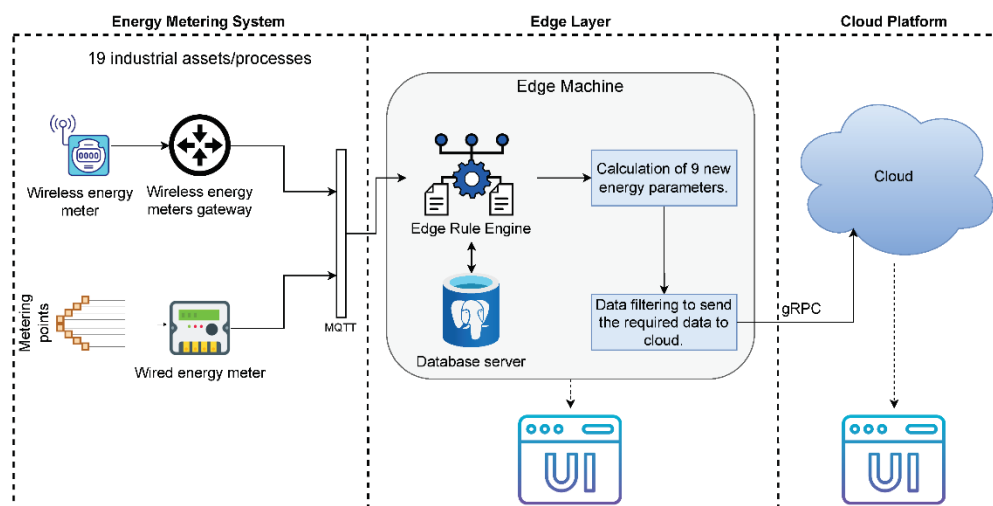


Рисунок 1.1 – Структурна схема енергозберігаючої автоматизованої системи на базі IoT

Системи енергозбереження у промисловості базуються на використанні принципів енергоефективності, що включають мінімізацію втрат енергії у процесах перетворення, транспортування та споживання, а також забезпечення високого коефіцієнта корисної дії обладнання. Для цього впроваджуються технології рекуперації енергії, які дозволяють повторно використовувати відпрацьоване тепло, тиск або кінетичну енергію, перетворюючи їх у корисну форму. Використання рекупераційних теплообмінників, утилізаційних котлів і систем теплових насосів дає можливість істотно скоротити загальні енергетичні витрати виробництва.

Важливу роль у забезпеченні енергозбереження відіграє впровадження інтелектуальних систем обліку та моніторингу енергоспоживання. Такі системи базуються на використанні мікроконтролерів, сенсорів, лічильників нового покоління та бездротових каналів зв'язку, які забезпечують безперервний збір і передачу даних про енергетичні параметри. Аналіз отриманої інформації у режимі реального часу дозволяє виявляти неефективні режими роботи обладнання, здійснювати прогнозування споживання, контролювати баланс енергоресурсів та своєчасно реагувати на відхилення. Впровадження таких систем сприяє створенню так званих «розумних підприємств» (Smart Industry), де процеси керування енергоспоживанням здійснюються автоматично на основі даних, що надходять із різних ділянок виробництва.

Теоретичні основи енергозбереження передбачають застосування енергетичних балансів, що відображають взаємозв'язок між надходженням, споживанням і втратами енергії у межах системи. Аналіз енергетичного балансу дозволяє визначати точки неефективності, здійснювати перерозподіл енергопотоків і впроваджувати заходи щодо оптимізації. Для цього використовуються методи математичного моделювання, які дають змогу кількісно оцінювати вплив окремих параметрів на загальну енергоефективність процесу. Особливо ефективними є моделі, що враховують нелінійність процесів, змінність навантаження та стохастичний характер збурень у промислових умовах.

Енергозбереження неможливе без створення системи автоматизованого керування, у якій енергетичні параметри включаються у контури регулювання поряд із технологічними. Такі системи дозволяють здійснювати багатокритеріальну оптимізацію, у якій мінімізація енергетичних витрат є одним із головних критеріїв ефективності. Алгоритми керування будуються на принципах адаптивного регулювання, що забезпечує автоматичне підлаштування під змінні режими роботи обладнання. У результаті формується система, здатна підтримувати оптимальний баланс між енергоспоживанням, продуктивністю та якістю технологічного процесу.

Особливу увагу в енергозберігаючих системах приділяється енергетичному

менеджменту, який є складовою загальної системи управління підприємством. Його функціями є планування, облік, контроль, аналіз і регулювання енергоспоживання з метою досягнення встановлених нормативів і показників ефективності. Впровадження міжнародного стандарту ISO 50001 «Системи енергетичного менеджменту» створює нормативну основу для систематичного підходу до підвищення енергоефективності та безперервного вдосконалення енергетичних процесів на підприємствах [14].

Розвиток сучасних промислових технологій зумовлює тісну інтеграцію енергозберігаючих систем із цифровими технологіями, що забезпечують підвищення рівня автоматизації, точності вимірювання та швидкодії обробки даних. Використання технологій штучного інтелекту, машинного навчання та цифрових двійників відкриває нові можливості для прогнозного управління енергоспоживанням, виявлення прихованих закономірностей у даних та визначення оптимальних стратегій керування. Цифровий двійник промислової системи дозволяє моделювати енергетичні процеси у віртуальному середовищі, що сприяє прийняттю обґрунтованих рішень щодо вдосконалення технологічних параметрів і підвищення загальної ефективності.

Таким чином, основи енергозбереження в промислових системах формуються на перетині технічних, економічних та інформаційних підходів, які у взаємодії забезпечують досягнення стратегічної мети – зниження енергетичних витрат при одночасному підвищенні надійності, стабільності та продуктивності промислового обладнання. Реалізація цих принципів створює передумови для переходу до енергоефективного виробництва, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку та ресурсозбереження.

### 1.3 Методи регулювання енергоспоживання: частотне керування, оптимізація режимів, датчики контролю

У сучасних промислових системах методи регулювання енергоспоживання ґрунтуються на комплексному підході, який поєднує технологічну оптимізацію, інтелектуальне керування режимами роботи обладнання та застосування високоточних вимірювальних засобів. Основна мета таких методів полягає у забезпеченні максимальної ефективності перетворення енергії при мінімальних витратах ресурсів і стабільному функціонуванні технологічних процесів. Впровадження систем автоматизованого регулювання дає змогу створювати адаптивні механізми взаємодії між джерелом енергії, споживачем та керуючими елементами, що забезпечують раціональний розподіл навантаження і зменшення пікових споживань.

Одним із найефективніших методів енергозберігаючого регулювання є частотне керування, яке базується на зміні частоти живлення електродвигунів для узгодження їх швидкості з фактичним навантаженням. Принцип дії цього методу полягає в тому, що потужність, споживана електродвигуном, прямо пропорційна кубу швидкості обертання вала, тому навіть незначне зменшення швидкості призводить до істотного зниження енергоспоживання. Частотні перетворювачі, що реалізують цей принцип, забезпечують плавний пуск, стабільність обертів, зниження механічних навантажень на вузли приводу та зменшення струмових перевантажень у мережі. Завдяки цьому частотне керування широко застосовується у вентиляційних системах, насосних установках, компресорному обладнанні, конвеєрних лініях та інших електромеханічних комплексах, де існує потреба у змінному режимі навантаження.

Застосування частотного регулювання забезпечує не лише енергозбереження, а й підвищення ресурсу експлуатації обладнання, зниження рівня вібрацій, шуму та механічного зносу, що безпосередньо впливає на технічну надійність системи в цілому. У сучасних системах автоматизації частотні

перетворювачі інтегруються у мережеві структури керування (SCADA, PLC, DCS), що дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг параметрів, автоматичне регулювання та оптимізацію процесів у режимі реального часу.



Рисунок 1.2 – Програмований логічний контролер (ПЛК) серії EASY EXM-12DC-DA-RT-WIFI

Наступним важливим напрямом енергозберігаючого регулювання є оптимізація режимів роботи обладнання, яка передбачає раціональний розподіл енергетичних ресурсів відповідно до змінних технологічних навантажень [15]. Основу цього методу становить використання алгоритмів математичної оптимізації, які дозволяють визначати найефективніші режими функціонування обладнання при заданих технологічних обмеженнях. Оптимізація може здійснюватися на основі аналітичних моделей енергоспоживання, які описують залежності між технологічними параметрами (тиском, температурою, швидкістю потоку, навантаженням) і витратами енергії.

Застосування методів оптимізації дає змогу зменшити втрати енергії, усунути нераціональні простої, узгодити роботу окремих агрегатів системи між собою, а також підвищити точність регулювання технологічних процесів. У сучасних умовах оптимізаційні методи реалізуються з використанням інтелектуальних алгоритмів – таких як генетичні алгоритми, метод рою частинок, нейронні мережі, нечітка логіка, що дозволяють адаптувати систему до змін зовнішніх факторів у реальному часі.

Невід'ємним елементом енергозберігаючого регулювання є система датчиків контролю, яка забезпечує збір, аналіз та передачу інформації про стан технологічного процесу і параметри споживання енергії. Датчики контролю вимірюють основні фізичні величини – напругу, струм, потужність, температуру, тиск, швидкість обертання, витрату рідин або газів, що дозволяє створювати точну картину енергетичного стану системи. На основі отриманих даних автоматизовані системи керування здійснюють динамічне регулювання енергопотоків, формують сигнали зворотного зв'язку та забезпечують оптимальне функціонування обладнання у заданих межах.

Сучасні сенсорні технології, зокрема цифрові датчики з протоколами передачі даних (Modbus, CAN, I2C, SPI), бездротові сенсори та інтелектуальні вимірювальні модулі, інтегруються у системи Інтернету речей (IoT), що дозволяє реалізовувати концепцію розумного енергоменеджменту. Завдяки цьому створюється можливість віддаленого моніторингу, діагностики та прогнозування енергетичних витрат з урахуванням поточного стану виробничих процесів [16].

Таким чином, частотне керування, оптимізація режимів і застосування датчиків контролю утворюють взаємопов'язану систему енергозберігаючого регулювання, у якій забезпечується баланс між економічністю, технологічною ефективністю та стабільністю роботи промислового обладнання. Реалізація зазначених методів сприяє формуванню адаптивних систем керування нового покоління, здатних до самоналаштування, аналітичної оцінки стану енергоспоживання та мінімізації втрат у реальному часі. Це забезпечує перехід промисловості до більш ефективної, екологічно орієнтованої та ресурсозберігаючої моделі виробництва, що відповідає сучасним тенденціям розвитку енергетичного менеджменту та автоматизації технологічних процесів.

## 1.4 Аналіз існуючих рішень з енергозберігаючої автоматизації

Аналіз існуючих рішень з енергозберігаючої автоматизації виявляє широкий спектр підходів, архітектур та технічних засобів, що застосовуються для зниження енергоспоживання на промислових підприємствах, причому кожне рішення орієнтується на поєднання вимірювальної інфраструктури, алгоритмів керування та аналітичних інструментів для прийняття оптимальних рішень у режимі реального часу. На рівні апаратної реалізації помітну присутність мають комплекти на базі програмованих логічних контролерів (PLC) у поєднанні зі SCADA-системами та розподіленими системами керування (DCS), які забезпечують надійний збір телеметрії, реалізацію локальних контурів регулювання і централізовану візуалізацію; у таких архітектурах реалізація енергоменеджменту полягає у додаванні модулів обліку енергії, підключенні частотних перетворювачів до контурів приводу та інтеграції алгоритмів оптимізації безпосередньо у контролери або вище розташовані програмні шари.

Суттєвим трендом у сучасних системах є впровадження платформ Інтернету речей (IoT) та телеметричних рішень, які дозволяють істотно розширити мережу сенсорів, знизити вартість підключення віддалених об'єктів і забезпечити масштабований збір даних для хмарної аналітики; такі платформи поєднують локальні шлюзи, що виконують попередню обробку сигналів і забезпечують безпечну передачу даних, із хмарними сервісами, що реалізують великомасштабну обробку, прогнозування та інструменти візуалізації, при цьому аналітичні модулі часто включають алгоритми машинного навчання для виявлення аномалій, прогнозного обслуговування та оптимізації робочих режимів.

У числі практичних рішень, що широко впроваджуються, присутні системи енергетичного менеджменту (Energy Management Systems, EMS), які інтегрують енергетичні баланси, модулі обліку та звітності, а також набори політик і процедур для управління споживанням електроенергії, теплової та паливної енергії з урахуванням нормативних вимог і стандартів, зокрема ISO 50001; реалізація EMS передбачає як технічні заходи – встановлення многотарифних лічильників,

датчиків та контролерів, так і організаційні процедури – планування навантажень, енергетичний аудит та регулярну оптимізацію режимів.

Частотне керування (VFD) у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами оптимізації завдань представлено у більшості сучасних рішень, оскільки воно дозволяє оперативнo узгоджувати продуктивність привода з реальними потребами технологічного процесу; інтеграція VFD у автоматизовані ланцюги здійснюється через локальні контролери або через промислові мережі з можливістю дистанційного налаштування профілів продуктивності, що забезпечує зменшення піків споживання і поліпшення показників коефіцієнта корисної дії [17].

Аналітичні рішення з оптимізації режимів роботи включають як класичні методи оптимізації (лінійне та нелінійне програмування, методи результуючого аналізу), так і евристичні та еволюційні алгоритми (генетичні алгоритми, алгоритми рою частинок) для вирішення задач багатокритеріальної оптимізації з урахуванням технологічних обмежень; у практичних впровадженнях такі алгоритми поєднуються з моделями цифрових двійників, що дозволяє проводити віртуальні експерименти, оцінювати вплив змін на енергоефективність і вибирати оптимальні параметри без втручання у реальний виробничий цикл.

Рішення для моніторингу та контролю енергоспоживання активно використовують інтелектуальні датчики та вимірювальні модулі з локальною обробкою сигналу, що зменшує обсяг передаваних даних і дозволяє виконувати первинну фільтрацію та виявлення подій; у поєднанні з протоколами промислової телекомунікації (Modbus, Profibus, EtherNet/IP) та бездротовими стандартами (LoRaWAN, NB-IoT, Wi-Fi) це забезпечує гнучке побудування мережі збору інформації для подальшої аналітики.

При аналізі існуючих рішень також виявляються характерні проблеми інтеграції та масштабування, зокрема сумісність обладнання різних виробників, відсутність єдиного стандарту для обміну метаданими енергетичного обліку, а також складнощі при впровадженні гібридних систем, де локальні PLC взаємодіють із хмарними сервісами й аналітичними платформами; усунення цих бар'єрів потребує розробки універсальних адаптерів, використання відкритих

протоколів та ретельного проектування архітектури із врахуванням кібербезпеки [18].

Кібербезпека представляє собою окремий напрям аналізу, оскільки підключення енергетичних підсистем до корпоративних мереж і хмарних платформ збільшує поверхню атак, що вимагає впровадження багаторівневих механізмів захисту – шифрування даних, сегментації мережі, автентифікації пристроїв та системи виявлення вторгнень; ігнорування цих аспектів призводить до підвищеного ризику маніпуляцій робочими режимами, що може спричинити як втрати енергії, так і аварійні ситуації.

Економічна оцінка рішень з енергозбереження включає аналіз терміну окупності інвестицій, зниження операційних витрат, зменшення простоїв та збільшення ресурсу обладнання, при цьому реалізація енергозберігаючих комплексів часто супроводжується середньо- та довгостроковим горизонтом окупності, що визначається масштабом модернізації, вартістю обладнання та ступенем автоматизації; досвід впроваджень вказує на те, що найбільш швидко економію забезпечують заходи, спрямовані на усунення пікових навантажень і впровадження частотного регулювання, тоді як комплексні проекти з цифровими двійниками та прогнозною аналітикою дають стабільний довгостроковий ефект.

Аналіз практичних кейсів демонструє, що успішні впровадження енергозберігаючих рішень вирізняються наявністю чіткого енергетичного аудиту, поетапною стратегією модернізації, тісною співпрацею між технологічними фахівцями та ІТ-командою, а також використанням адаптивних алгоритмів, які враховують особливості технологічного циклу. Негативні приклади показують, що відсутність підготовки персоналу, недостатня якість первинних даних і відсутність плану обслуговування сенсорної мережі призводять до неефективності системи навіть за наявності сучасного обладнання.

Отже, існуючі рішення з енергозберігаючої автоматизації представляють собою сукупність технологічних і інформаційних компонентів, у яких ефективність досягається завдяки поєднанню точного вимірювання, адаптивних алгоритмів регулювання та системної інтеграції з врахуванням вимог безпеки й економічної

доцільності; перспективність подальшого розвитку полягає у глибшій інтеграції цифрових двійників, штучного інтелекту та розподілених енергетичних ресурсів для забезпечення автономного, самоналагоджувального і енергоефективного функціонування промислових систем.

### 1.5 Висновки до першого розділу

Серед промислових енергозберігаючих рішень, що вже представлені на ринку, варто відзначити систему Siemens Desigo CC, яка забезпечує комплексне управління будівлями та виробничими об'єктами, включаючи моніторинг споживання енергоресурсів, автоматичне регулювання освітлення, вентиляції, температурних режимів і систем безпеки. Її основною перевагою є масштабованість та інтеграція з іншими системами автоматизації, зокрема SCADA та BMS. Однак суттєвим недоліком цієї системи є висока вартість впровадження та потреба у спеціалізованих фахівцях для обслуговування, що обмежує її застосування у малих та середніх підприємствах.

Іншим прикладом сучасного рішення є Schneider Electric EcoStruxure™, орієнтована на створення «розумних» енергоефективних підприємств. Платформа підтримує IoT-з'єднання, збір і аналітику даних у реальному часі, а також автоматичне керування навантаженнями для зменшення пікових витрат енергії. До її переваг належать висока гнучкість, модульність і підтримка відкритих протоколів. Водночас слабким місцем системи залишається складність інтеграції зі старими типами промислового обладнання, а також обмеження в індивідуальному налаштуванні під специфічні технологічні процеси.

Загалом аналіз існуючих рішень показує, що більшість сучасних систем орієнтовані на комплексну цифровізацію та аналітику енергоспоживання, проте мають певні обмеження: високу вартість, складність налаштування, відсутність універсальності щодо обладнання різних виробників, а також потребу в стабільному мережевому підключенні для обміну даними. Це створює передумови для розробки спрощених, економічно доцільних і адаптивних систем

енергозберігаючої автоматизації, які можуть ефективно функціонувати в умовах різних виробничих середовищ [19].

Отже, актуальною проблемою залишається пошук оптимальних технічних і програмних рішень, здатних забезпечити ефективне енергозбереження при мінімальних витратах на впровадження та обслуговування. Крім того, потребує подальшого вдосконалення інтеграція таких систем із існуючим технологічним обладнанням без необхідності його масштабної модернізації. Саме ці напрями стають підґрунтям для подальших досліджень і розробок у галузі енергоефективної автоматизації.

Виходячи з аналізу сучасного стану енергозберігаючих систем та наявних рішень на ринку, можна сформулювати основну задачу дослідження – розробку або удосконалення системи автоматизованого керування енергоспоживанням, яка поєднуватиме високий рівень енергоефективності, простоту інтеграції, адаптивність до різних виробничих умов та економічну доцільність. Дослідження має бути спрямоване на підвищення ефективності енергозбереження за рахунок оптимізації алгоритмів регулювання, покращення точності контролю параметрів енергоспоживання, а також впровадження сучасних інтелектуальних технологій аналізу даних, що дозволять знизити витрати та підвищити стабільність роботи виробничих систем.

## 2 РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО РЕГУЛЮВАННЯ

### 2.1 Вибір об'єкта автоматизації

У сучасних промислових системах одними з основних споживачів електричної енергії є насосні установки, що забезпечують транспортування рідин у різних технологічних процесах. Насоси використовуються у системах водопостачання, тепlopостачання, охолодження, у хімічному, енергетичному, харчовому та нафтохімічному виробництвах. Їхня експлуатація потребує значних енергетичних витрат, оскільки потужність електроприводів часто вибирається з великим запасом, а робота здійснюється при постійній швидкості обертання незалежно від фактичної потреби в подачі. Унаслідок цього значна частина енергії витрачається на подолання гідравлічного опору, що знижує загальну ефективність технологічного процесу.

Об'єктом автоматизації обирається центробіжний насос середньої продуктивності, який використовується у системі циркуляційного водопостачання промислового підприємства. Такий насос забезпечує безперервну подачу охолоджувальної або технологічної рідини в замкненому контурі, підтримуючи сталий тиск і витрату. Вибір саме цього типу обладнання зумовлений його універсальністю, надійністю, доступністю елементної бази для модернізації та широким діапазоном регулювання гідравлічних параметрів.

Центробіжний насос являє собою агрегат, що складається з корпусу з робочим колесом, яке приводиться в рух електродвигуном змінного струму. Під час обертання лопаті створюють відцентрову силу, що перетворює механічну енергію приводу на кінетичну енергію потоку рідини. Внаслідок цього рідина рухається від центра колеса до периферії, де тиск збільшується. Основними параметрами, що характеризують роботу насоса, є подача, напір, частота обертання, потужність електроприводу та коефіцієнт корисної дії.

У типовій системі подібний насос працює в парі з трубопроводом, у якому

розміщені регулювальні клапани, засувки, фільтри, датчики тиску, витрати й температури. Гідравлічний опір системи змінюється залежно від технологічного навантаження, тому виникає потреба у регулюванні подачі для забезпечення сталих параметрів процесу. У традиційних схемах це регулювання виконується за допомогою дроселювання потоку або байпасування частини рідини, що призводить до додаткових втрат тиску й марного споживання електроенергії.

З огляду на залежність потужності, споживаної насосом, від частоти обертання електродвигуна (пропорційність кубу швидкості), навіть незначне зменшення частоти дозволяє суттєво знизити енергоспоживання. Тому головним напрямом удосконалення є впровадження частотно-регульованого електроприводу (ЧРЕП), який забезпечує автоматичну зміну швидкості обертання вала залежно від фактичного навантаження. Такий підхід дає змогу адаптувати роботу насоса до реальних умов експлуатації, мінімізуючи перевитрати електроенергії та забезпечуючи плавність пуску й зупинки агрегату.

Технічні характеристики вибраного насосного обладнання відповідають типовим параметрам промислових систем середнього тиску:

- номінальна подача від 100 м<sup>3</sup>/год до 120 м<sup>3</sup>/год;
- номінальний напір від 30 м до 35 м;
- частота обертання ротора до 1450 об/хв;
- потужність електродвигуна від 11 кВт до 15 кВт;
- номінальна напруга живлення до 380 В;
- коефіцієнт корисної дії від 75% до 80 %.

Такі параметри забезпечують стабільну подачу технологічної рідини в промислових системах охолодження, промивання або транспортування. Крім того, вони дозволяють використовувати доступні серійні перетворювачі частоти та сенсорне обладнання для створення замкненого контуру автоматичного регулювання.

Для забезпечення ефективного керування насосною установкою система автоматизації повинна контролювати такі параметри:

- тиск на виході насоса;

- витрату рідини в трубопроводі;
- рівень рідини в резервуарі або баку;
- температуру робочого середовища;
- струм і частоту живлення електродвигуна.

Збирання інформації здійснюється за допомогою первинних датчиків (тискових перетворювачів, термопар, ультразвукових витратомірів, рівнемірів), які формують аналогові або цифрові сигнали для подальшої обробки у контролері. Отримані дані аналізуються у режимі реального часу, після чого контролер формує сигнали керування на виконавчі пристрої – зокрема на перетворювач частоти, який регулює швидкість обертання двигуна.

У процесі вибору об'єкта автоматизації враховується низка експлуатаційних особливостей насосної установки. До основних належать інерційність зміни гідравлічних параметрів, чутливість до перепадів тиску, можливість виникнення кавітаційних явищ при зниженні подачі, а також необхідність забезпечення плавного пуску, щоб уникнути гідроударів. Врахування цих факторів є обов'язковим при побудові алгоритму керування і виборі відповідних датчиків та регуляторів [20].

Серед переваг вибору центробіжного насоса як об'єкта автоматизації виділяються висока надійність, відносна простота конструкції, передбачуваність характеристик, наявність аналітичних моделей, що описують його роботу, а також значна частка споживаної енергії у структурі витрат підприємства, що робить систему регулювання економічно доцільною. Крім того, такий об'єкт має широкий спектр галузевого застосування, що підвищує практичну цінність результатів розроблення.

Водночас насосні системи мають обмеження, пов'язані з нелінійністю гідравлічних характеристик, впливом температури й в'язкості рідини на продуктивність, а також із потребою постійного технічного обслуговування. Саме тому автоматизація повинна передбачати функції діагностики, контролю стану обладнання і захисту від аварійних режимів.

Таким чином, вибір центробіжного насоса як об'єкта автоматизації є технічно

обґрунтованим рішенням для реалізації системи енергозберігаючого регулювання. Об'єкт характеризується чітко визначеними вхідними та вихідними параметрами, значним потенціалом енергозбереження, а також можливістю інтеграції з сучасними засобами вимірювання, контролю та керування. На основі проведеного аналізу формуються вимоги до структури, апаратного складу і функціональних характеристик системи автоматизації, що розглядається в наступному підрозділі.

## 2.2 Розроблення структурної схеми системи керування

Розроблення структурної схеми системи автоматизації енергозберігаючого регулювання є ключовим етапом у створенні ефективної системи керування промисловим обладнанням. Структурна схема визначає взаємозв'язки між основними елементами системи, описує принципи обміну сигналами та забезпечує наочне уявлення про процеси автоматичного регулювання. Основною метою побудови структурної схеми є реалізація оптимального енергоспоживання обладнання при збереженні необхідних технологічних параметрів процесу.

На прикладі системи керування відцентровим насосом структурна схема передбачає наявність таких основних елементів: технологічного об'єкта (насос з електродвигуном), вимірювальних пристроїв, контролера, виконавчих механізмів, частотного перетворювача, а також системи збору та відображення інформації. У процесі роботи система здійснює безперервний моніторинг технологічних параметрів – тиску, витрати, споживаного струму, температури електродвигуна та рівня вібрацій. Отримані дані надходять на контролер, де відбувається їх оброблення, аналіз відхилень від заданих значень та формування сигналів керування.

Контролер виконує функції логічного та пропорційно-інтегрально-диференціального (ПІД) регулювання, завдяки чому забезпечується плавна зміна частоти обертання двигуна через частотний перетворювач. Такий підхід дозволяє автоматично підтримувати необхідний технологічний режим при мінімальному енергоспоживанні. Крім того, система може функціонувати в декількох режимах –

автоматичному, ручному та аварійному. В автоматичному режимі відбувається повна координація роботи за допомогою алгоритмів оптимізації, у ручному – оператор має можливість змінювати параметри безпосередньо, а в аварійному – система переходить у безпечний режим роботи із зупинкою двигуна або зниженням навантаження.

Для забезпечення високого рівня енергоефективності передбачено блок збору та аналізу енергетичних показників, який дозволяє визначати коефіцієнт корисної дії системи, питомі витрати енергії та виявляти нераціональні режими роботи. Також схема містить підсистему діагностики, яка контролює стан обладнання та прогнозує можливі відмови на основі аналізу коливань струму, вібрацій і температури. Це підвищує надійність експлуатації обладнання та зменшує ймовірність простоїв.

З метою візуалізації процесів передбачено панель оператора з інтерфейсом SCADA, яка відображає поточні значення параметрів, графіки зміни тиску, частоти обертання та споживаної потужності. Через цей інтерфейс оператор має змогу задавати нові уставки, контролювати виконання алгоритмів регулювання та отримувати попередження про відхилення від нормального режиму роботи. Взаємодія між усіма елементами системи здійснюється за допомогою промислового протоколу зв'язку, наприклад Modbus або Profibus, що забезпечує надійну передачу даних у реальному часі.

У структурній схемі передбачено також підсистему архівації даних, яка зберігає історію параметрів для подальшого аналізу, що є важливим для оцінки ефективності енергозбереження та вдосконалення алгоритмів регулювання. На основі накопичених даних можливе впровадження елементів адаптивного керування, коли система самостійно підлаштовує параметри регуляторів під змінні умови експлуатації.

Таким чином, розроблена структурна схема системи автоматизації енергозберігаючого регулювання забезпечує комплексний підхід до управління промисловим обладнанням. Вона поєднує вимірювальні, керувальні, аналітичні та візуалізаційні елементи в єдину інтегровану систему, що дозволяє мінімізувати

енергоспоживання, підвищити стабільність технологічного процесу та продовжити термін служби обладнання.

Розроблення структурної схеми системи керування передбачає детальне визначення всіх функціональних взаємозв'язків між основними елементами, що забезпечують стабільну, безпечну та енергоефективну роботу технологічного обладнання. Система керування для енергозберігаючого регулювання побудована за ієрархічним принципом, де кожен рівень виконує специфічні завдання – від збору даних до прийняття керуючих рішень і передачі їх виконавчим механізмам [21].

На нижньому рівні системи розташовані первинні вимірювальні перетворювачі, які реєструють параметри технологічного процесу – тиск, витрату рідини, температуру, рівень вібрацій та електричні показники двигуна. Ці датчики формують аналогові сигнали, які через модулі вводу/виводу надходять до контролера. Використання сучасних цифрових датчиків із підтримкою протоколів HART або Modbus RTU дозволяє підвищити точність вимірювань і зменшити похибки, що особливо важливо для систем з високими вимогами до енергоефективності.

Контролер є центральним елементом схеми, що забезпечує обробку вхідних сигналів, виконання алгоритмів регулювання та формування керуючих впливів на виконавчі пристрої. Для енергозберігаючого регулювання використовується алгоритм ПД-регулювання з адаптивною корекцією коефіцієнтів. Це дозволяє забезпечити стабільність параметрів навіть при зміні навантаження або тиску в системі. Крім того, контролер реалізує функції оптимізації режимів роботи, автоматичного перемикавання швидкостей двигуна, а також діагностику стану обладнання.

Вихідні сигнали контролера передаються на частотний перетворювач, який змінює частоту живлення електродвигуна насоса, що дозволяє плавно регулювати його швидкість. Зменшення швидкості обертання при частковому навантаженні призводить до суттєвого скорочення енергоспоживання, оскільки потужність, що витрачається на перекачування рідини, пропорційна кубу швидкості. Таким чином,

навіть незначне зниження швидкості забезпечує відчутний енергетичний ефект.

На рівні виконавчих механізмів система включає електропривод насоса, запірно-регулювальну арматуру, зворотні клапани та захисні пристрої, які забезпечують стабільність та безпечність процесу. Керування здійснюється автоматично відповідно до заданих уставок або з панелі оператора. Для запобігання аваріям у структурну схему включено систему аварійного захисту (АСЗ), яка здійснює миттєве відключення обладнання при перевищенні допустимих значень тиску, струму чи температури.

Важливим елементом є система моніторингу та візуалізації, реалізована на базі SCADA-комплексу. Вона дозволяє оператору спостерігати за поточними параметрами процесу, змінювати режими роботи, задавати уставки, аналізувати графіки змін параметрів у реальному часі та отримувати повідомлення про несправності. Інтерфейс системи побудований у зручній графічній формі, що забезпечує швидке сприйняття інформації та оперативне прийняття рішень [22].

Для підвищення ефективності управління передбачено модуль збору статистичних даних, який архівує усі параметри процесу в базі даних. Це дає змогу здійснювати аналіз енергоспоживання, порівнювати показники за різні періоди часу, оцінювати ефективність роботи регулятора та виявляти потенційні резерви енергозбереження. На основі накопиченої інформації можлива реалізація функцій предиктивного аналізу, що дозволяє прогнозувати відмови обладнання та здійснювати технічне обслуговування за станом, а не за графіком.

Зв'язок між усіма компонентами системи реалізується через промислову мережу, побудовану за протоколами Modbus TCP або Profibus DP. Це забезпечує високу швидкість обміну даними, надійність передачі сигналів та масштабованість системи. У разі потреби до мережі можуть бути підключені додаткові контролери, сенсори або модулі збору даних без необхідності повної реконфігурації обладнання.

Для підвищення рівня безпеки передбачено модуль резервування живлення та захист від перевантаження по струму, що гарантує безперебійну роботу системи навіть у разі перебоїв електроживлення. Також у схемі використовується

інтелектуальний алгоритм оптимізації, який визначає оптимальні параметри роботи двигуна відповідно до поточного навантаження, забезпечуючи максимальний коефіцієнт корисної дії при мінімальних втратах енергії.

Таким чином, структурна схема системи керування енергозберігаючим регулюванням відображає комплексний підхід до організації автоматизованого процесу. Вона поєднує сучасні засоби вимірювання, інтелектуальні алгоритми керування, системи візуалізації та аналітики в єдину інтегровану платформу. Це дозволяє підвищити енергоефективність, стабільність і надійність технологічних процесів на промислових підприємствах, одночасно знижуючи експлуатаційні витрати та негативний вплив на довкілля.

### 2.3 Вибір технічних засобів

Охорона інформації від витоку через технічні канали є одним із найважливіших напрямів сучасної кібербезпеки, адже більшість інформаційних систем сьогодні функціонує з використанням складного комплексу технічних засобів, кожен з яких потенційно може стати джерелом побічного випромінювання або витоку даних. Технічні канали витоку – це несанкціоновані шляхи доступу до інформації, які виникають через фізичні процеси, що супроводжують роботу електронних, акустичних, оптичних або вібраційних систем. Ці канали формуються мимовільно – через електромагнітні поля, шумові коливання, вібрації корпусів пристроїв, паразитні сигнали в електричних мережах або відбиття світлових потоків. На практиці це означає, що зловмисник може отримати доступ до конфіденційної інформації навіть без підключення до мережі – шляхом аналізу побічних сигналів, які генеруються технікою під час її роботи.



Рисунок 2.1 – Камера/кімната з екранізацією (Faraday / TEMPEST-кімната)

Основними типами технічних каналів витоку є електромагнітні, акустичні, вібраційні, оптичні, теплові та комбіновані. Електромагнітні канали формуються через побічні електромагнітні випромінювання від пристроїв обробки даних – комп’ютерів, моніторів, роутерів, блоків живлення. Такі випромінювання можуть бути зафіксовані спеціальними антенами або радіоприймачами на значній відстані, що дозволяє зчитувати інформацію з екранів або клавіатур. Акустичні канали пов’язані з поширенням звукових хвиль: мова, шум клавіш, клацання миші, вібрації корпусу можуть бути зафіксовані мікрофонами або лазерними сенсорами. Оптичні канали виникають через відбиття світла від екранів, лінз, блискучих поверхонь, а також через використання лазерних систем спостереження, що дозволяють реконструювати зображення чи текст. Вібраційні канали формуються через передачу механічних коливань на конструкції будівель або обладнання, які можуть бути перетворені у звукову або цифрову інформацію. Теплові канали реалізуються через аналіз теплового випромінювання компонентів комп’ютерів або інших

пристроїв, що дозволяє відтворювати активність користувачів. У реальних умовах витік інформації може відбуватися одночасно через кілька типів каналів, що суттєво ускладнює їх виявлення та ліквідацію.



Рисунок 2.2 – Лазерний вібрometr / лабораторний стенд

Для ефективного захисту інформації необхідно застосовувати систему заходів, яка поєднує організаційні, технічні, програмні та правові методи. Організаційні заходи спрямовані на запобігання створенню умов для виникнення каналів витоку. До них належить створення контрольованих зон, регламентування доступу до приміщень, де обробляється конфіденційна інформація, використання спеціальних правил поведінки з технікою, проведення навчань персоналу, запровадження політики безпеки. Наприклад, у приміщеннях, де обробляються

секретні дані, забороняється використання особистих мобільних пристроїв, бездротових мереж або відеоспостереження, що знижує ризик створення додаткових каналів витоку.

Технічні методи протидії витоку інформації полягають у фізичному або електронному блокуванні побічних сигналів. До основних заходів належить екранізація обладнання – покриття корпусів спеціальними матеріалами, що поглинають або відбивають електромагнітні хвилі, а також заземлення для зниження рівня паразитних струмів. У випадку акустичних каналів застосовуються звукопоглинальні матеріали, подвійні стіни, ущільнення дверей та вікон, а також акустичні глушники. Вібраційні канали блокуються шляхом ізоляції обладнання від конструкцій будівлі або застосування спеціальних демпферів. Для усунення оптичних каналів використовують антиблікові покриття, системи затемнення, а також спеціальні штори або плівки, що не пропускають світло певного спектра. Крім того, ефективним є застосування активних методів – генераторів шуму або електромагнітних завад, які створюють фонові сигнали, що унеможливають перехоплення корисної інформації.

Програмні методи захисту спрямовані на виявлення та блокування витоку даних через мережеві або периферійні канали. До них належать системи контролю витоку даних (DLP), які аналізують усі вхідні та вихідні потоки інформації, фіксують спроби копіювання або передавання конфіденційних відомостей, контролюють роботу знімних носіїв. Також застосовуються засоби криптографічного захисту, які забезпечують шифрування даних при їх збереженні та передачі, системи контролю доступу до інформаційних ресурсів, програмні монітори, що відстежують активність користувачів і процесів.

Надзвичайно важливою складовою системи захисту є нормативно-правове регулювання. В Україні правові засади технічного захисту інформації визначаються законами «Про інформацію», «Про захист інформації в інформаційно-телекомунікаційних системах», а також ДСТУ 3396.0-96 і пов'язаними стандартами. Ці документи встановлюють класифікацію інформації за рівнем доступу, вимоги до сертифікації технічних засобів, порядок створення

систем технічного захисту та критерії оцінювання їх ефективності. Окрему роль відіграє система атестації об'єктів інформаційної діяльності, що підтверджує відповідність технічних засобів вимогам безпеки.

У сучасних умовах розвитку технологій особливої актуальності набуває захист від витоку інформації через бездротові мережі, системи інтернету речей (IoT) та мобільні пристрої. Новітні методи атак, такі як побічний аналіз електромагнітних полів процесорів або зчитування електричних шумів у ланцюгах живлення, дозволяють зловмисникам відновлювати оброблювані дані навіть без безпосереднього доступу до комп'ютера. У зв'язку з цим сучасні стратегії кіберзахисту передбачають інтеграцію систем контролю побічних випромінювань, безперервний моніторинг технічного стану обладнання, а також використання адаптивних технологій, що автоматично змінюють параметри роботи пристроїв для ускладнення аналізу сигналів.

Отже, ефективна протидія витоку інформації через технічні канали можлива лише за умови комплексного підходу, що поєднує науково обґрунтовані методи, сучасні технічні рішення, правове забезпечення та високу дисципліну персоналу. Система технічного захисту інформації повинна функціонувати як єдиний організм, у якому кожен елемент – від обладнання до користувача – є частиною загального контуру безпеки. Регулярне проведення перевірок, тестування на проникнення, оновлення технічних і програмних засобів, підвищення кваліфікації спеціалістів та впровадження інноваційних технологій є основою стабільного функціонування будь-якої інформаційної системи. Тільки системний підхід, що враховує усі можливі фізичні, технічні й людські фактори, здатен забезпечити надійний захист інформації від витоку через технічні канали в умовах постійного зростання кіберзагроз.

#### 2.4 Системи та принципи енергозберігаючого регулювання

Алгоритм роботи системи автоматизації енергозберігаючого регулювання промислового обладнання ґрунтується на принципі адаптивного управління

енергоспоживанням залежно від поточних технологічних параметрів і умов експлуатації. Основна мета алгоритму полягає у забезпеченні стабільної роботи об'єкта автоматизації при мінімально можливих витратах електроенергії, без зниження ефективності технологічного процесу. Система виконує постійний моніторинг усіх основних параметрів – споживаного струму, тиску, швидкості обертання двигуна, температури, рівня вібрації, витрати робочого середовища тощо. Зібрані дані передаються на контролер, який порівнює їх із заданими референсними значеннями, визначає відхилення та приймає рішення щодо коригування режимів роботи приводу.

Робота системи починається з етапу ініціалізації, під час якого контролер проводить перевірку працездатності датчиків, стану зв'язку, калібрування та зчитування початкових параметрів середовища. Далі відбувається перехід до режиму активного моніторингу. На цьому етапі контролер з певною періодичністю отримує сигнали від датчиків і виконує обробку отриманих даних за допомогою цифрових фільтрів для усунення шумів і випадкових коливань. Потім інформація надходить до модуля прийняття рішень, де здійснюється аналіз відхилення поточного значення параметра від заданого діапазону. Якщо система виявляє перевищення або зниження контрольного параметра, спрацьовує регулюючий механізм.

Принцип енергозберігаючого регулювання реалізується шляхом зміни частоти обертання електродвигуна за допомогою перетворювача частоти. Наприклад, у насосній установці зниження швидкості обертання вала призводить до зменшення витрати робочої рідини та споживаної потужності, що дозволяє досягати значної економії електроенергії без втрати технологічних характеристик системи. Відповідно до закону подібності насосів, потужність, споживана двигуном, пропорційна кубу швидкості обертання. Таким чином, навіть незначне зниження частоти обертання, наприклад на 10%, може забезпечити економію енергії від 25% до 30%.

Для реалізації цього принципу контролер формує керуючий сигнал, який подається на частотний перетворювач, що регулює напругу та частоту живлення

електродвигуна. При цьому система враховує динамічні характеристики процесу, щоб уникнути різких переходів, перевантажень або коливань тиску в системі. У разі зміни технологічного навантаження – наприклад, підвищення споживання або тиску – алгоритм автоматично збільшує швидкість обертання двигуна до необхідного рівня, підтримуючи заданий параметр у стабільних межах.

Важливою складовою алгоритму є модуль адаптації, який аналізує накопичені дані про роботу системи протягом певного часу. На основі цих даних здійснюється побудова оптимізаційних профілів роботи обладнання, що дозволяє прогнозувати навантаження та автоматично підбирати найефективніші режими енергоспоживання. Наприклад, у години зниженого навантаження система може переводити обладнання у режим часткового навантаження або короткочасної зупинки, що додатково скорочує витрати енергії.

Для підвищення точності регулювання застосовується принцип зворотного зв'язку. Система постійно аналізує результат своїх дій: якщо після зміни частоти обертання параметр не досягає заданого значення або перевищує його, алгоритм вносить корективи у реальному часі. Таким чином формується замкнений контур автоматичного управління, який забезпечує стабільність і енергоефективність процесу навіть при зміні зовнішніх факторів.

Ще одним важливим аспектом алгоритму є реалізація режиму самодіагностики та аварійного реагування. Якщо система фіксує відхилення, що перевищують допустимі межі, або несправність будь-якого елемента (наприклад, обрив сигналу з датчика, перегрів приводу, перевантаження двигуна), вона переходить у безпечний режим роботи. При цьому контролер видає попереджувальний сигнал оператору та формує звіт про подію для подальшого аналізу. Така функціональність не лише підвищує надійність системи, але й запобігає аваріям, що можуть призвести до додаткових енергетичних втрат або пошкодження обладнання.

Принципи енергозберігаючого регулювання також базуються на інтеграції інтелектуальних функцій, таких як прогнозування споживання енергії, аналіз ефективності роботи приводу та розрахунок коефіцієнта енергетичної

продуктивності (Energy Efficiency Ratio). У більш складних системах може застосовуватися штучний інтелект або нечітка логіка для оптимізації параметрів у реальному часі, що дозволяє враховувати нелінійності процесу й зовнішні збурення.

## 2.5 Моделювання системи в середовищі

Моделювання автоматизованої системи енергозберігаючого регулювання здійснюється в середовищі MATLAB/Simulink (або іншому обраному інструменті), що дозволяє спроектувати «віртуальний об'єкт» (насос + привод + система регулювання) і протестувати алгоритми без ризику для реального обладнання. У моделі реалізується динамічна поведінка об'єкта, входи/виходи системи управління, зворотні зв'язки та блоки контролера згідно з розробленим алгоритмом (після підрозділу 2.4).

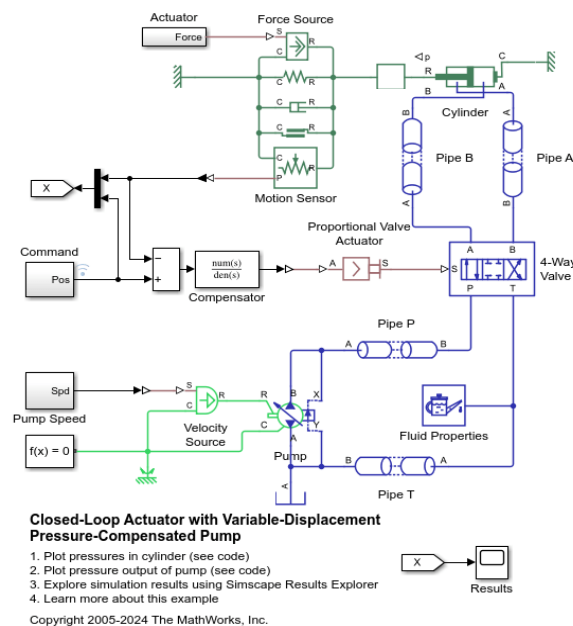


Рисунок 2.3 – Блок-діаграма замкненого контуру регулювання в MATLAB/Simulink

У середовищі Simulink створюється модель об'єкта – гідравлічна ланка насоса з відповідною передаточною функцією або диференційними рівняннями, що

враховують залежність тиску від подачі, втрати у трубопроводі, інерційність рідини. До цього додається модель електроприводу та перетворювача частоти, який отримує керуючий сигнал і змінює частоту обертання двигуна. Далі вводяться блоки вимірювань (імітація датчиків тиску, витрати, температури), додаткові фільтри шумів, модулі порівняння з уставками та блок регулятора (ПД або інший адаптивний метод). Усі ці частини з'єднуються у замкненому контурі з урахуванням часових затримок, нелінійностей та обмежень на керуючі дії (максимальна/мінімальна частота, граничні струми).

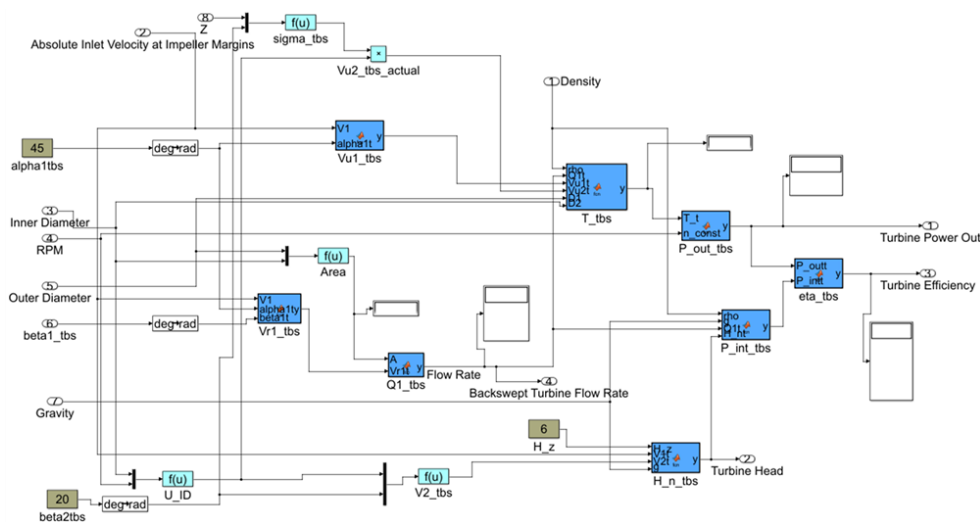


Рисунок 2.4 – Симульована модель системи насос + контролер у середовищі Simulink.

Після побудови моделі проводяться симуляції в різних режимах роботи: нормальний режим навантаження, перевантаження, змінне навантаження, аварійні ситуації. Важливо перевірити стабільність системи, час переходу, перерегулювання, стійкість до збурень. За результатами симуляцій оцінюються показники ефективності: енергоспоживання, споживана потужність, відхилення технологічних параметрів, енергія, що втрачена через регулювання, коефіцієнт корисної дії.

Додатково модель може включати модуль адаптації: алгоритм, що змінює коефіцієнти регулятора на основі історичних даних, передбачення навантаження або інші інтелектуальні підходи. Відповідно в моделі можна вводити сценарії

прогнозного керування або нечіткої логіки й порівняти їх з класичним ПД-регулятором.

Для підвищення реалістичності можна застосувати режим «Hardware-in-the-Loop (HIL)» або «Software-in-the-Loop (SIL)», коли модель контролера або навіть частина реального обладнання підключається до симуляції. Це дозволяє протестувати взаємодію апаратної частини з моделлю об'єкта в реальному часі, перевірити затримки, комунікаційні обмеження та надійність алгоритмів.

## 2.6 Висновки до другого розділу

Підсумком моделювання є оцінка ефективності обраної конфігурації – чи досягається суттєве зниження енергоспоживання, чи підтримуються технологічні параметри, які режими виявляються оптимальними. На основі результатів моделювання вносяться корективи у алгоритм або налаштування регулятора, після чого модель знову тестується, доки не буде досягнуто компроміс між стабільністю, точністю та енергоефективністю.

Загалом, розроблений алгоритм роботи системи автоматизації забезпечує не лише ефективне управління енергоспоживанням, але й підвищує ресурс обладнання за рахунок зменшення механічних навантажень і перегрівів, знижує рівень шуму та вібрацій, а також сприяє екологічній стійкості виробництва. Реалізація такого підходу дозволяє створити сучасну, гнучку й надійну систему енергозберігаючого регулювання, що відповідає вимогам промислових стандартів і концепції сталого розвитку.

### **3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СИСТЕМИ**

#### **3.1 Методика проведення експериментальних досліджень**

Експериментальні дослідження системи автоматизації енергозберігаючого регулювання виконуються з метою оцінювання її функціональних характеристик, стабільності роботи, швидкодії, точності підтримання технологічних параметрів та ефективності енергоспоживання. Методика досліджень ґрунтується на комплексному підході, що поєднує лабораторне моделювання процесів, реєстрацію фізичних параметрів у реальному часі, аналіз динамічних характеристик системи та порівняння отриманих результатів із теоретичними розрахунками.

У процесі дослідження формується експериментальний стенд, який включає модель центробіжного насоса з електроприводом, частотно-регульований перетворювач, вимірювальні датчики тиску, витрати, температури, струму та напруги, а також контролер, що реалізує алгоритм автоматичного регулювання. Вимірювальні сигнали подаються на вхід контролера, де здійснюється їх цифрова обробка, фільтрація шумів та порівняння з уставками. Керуючі впливи передаються на частотний перетворювач, який змінює швидкість обертання електродвигуна відповідно до поточного навантаження. Для моніторингу процесів використовується програмне середовище MATLAB/Simulink, що забезпечує візуалізацію змін параметрів у реальному часі та побудову динамічних графіків енергоспоживання.

Під час експерименту визначаються основні залежності між частотою обертання ротора, тиском на виході насоса, витратою рідини та споживаною потужністю електропривода. Для кожного режиму роботи задаються фіксовані значення уставки тиску, після чого контролер автоматично змінює частоту живлення двигуна до досягнення стабільного стану. Фіксуються перехідні процеси, тривалість стабілізації, величина перерегулювання та середнє відхилення параметра від заданого значення. Отримані дані використовуються для побудови

характеристик системи регулювання та визначення її статичних і динамічних похибок.

Додатково виконується оцінювання ефективності енергоспоживання шляхом порівняння режимів роботи з частотно-регульованим електроприводом і без нього. Для цього вимірюється активна потужність у ланцюзі живлення двигуна, а також коефіцієнт корисної дії системи при різних рівнях навантаження. Розрахунок питомих енергетичних витрат здійснюється за співвідношенням між спожитою електроенергією та обсягом перекачаної рідини. Під час експерименту фіксується також температура обмоток двигуна, що дозволяє оцінити теплові втрати та стабільність роботи при тривалих навантаженнях.

З метою підвищення достовірності результатів усі вимірювання повторюються не менше трьох разів у кожному режимі. Середні значення розраховуються на основі статистичної обробки результатів з урахуванням середньоквадратичного відхилення. Отримані експериментальні дані порівнюються з результатами математичного моделювання, що дозволяє перевірити адекватність побудованої моделі та коректність використаних алгоритмів регулювання. Представлені динамічні та статичні показники системи регулювання (табл. 3.1) для підвищення точності моделювання.

Таблиця 3.1 – Динамічні та статичні показники системи регулювання

Режим роботи	Уставка тиску, кПа	Час стабілізації, с	Перерегулювання, %	Середнє відхилення, %	Частота двигуна, Гц
Низький	150	2.8	4.2	1.1	32
Середній	200	3.4	3.6	0.9	41
Високий	250	4.1	5.1	1.4	50

Особлива увага приділяється аналізу впливу параметрів регулятора на якість керування. Для цього виконується серія експериментів із варіюванням коефіцієнтів П, І та Д складових у регуляторі. Визначається оптимальне співвідношення параметрів, що забезпечує мінімальну енергетичну витрату при заданій точності регулювання. Додатково досліджується вплив затримки сигналу у контурі

зворотного зв'язку на стійкість системи. Для цього вводяться програмні затримки різної тривалості, а зміни поведінки системи фіксуються за допомогою осцилограм та графіків перехідних процесів. Подається порівняння енергоспоживання з ЧРП та без ЧРП (табл. 3.2) для нашого моделювання.

Таблиця 3.2 – Порівняння енергоспоживання з ЧРП та без ЧРП

Режим навантаження	Потужність без ЧРП, кВт	Потужність з ЧРП, кВт	Економія, %	Температура обмоток, °С
30 %	4.8	3.1	35.4	58
60 %	6.2	4.5	27.4	63
100 %	7.9	6.1	22.8	69

У ході експерименту здійснюється моніторинг основних технічних показників системи: середнього часу реакції контролера, енергетичного коефіцієнта корисної дії, коефіцієнта пульсацій потужності, рівня вібрацій електродвигуна, а також температури навколишнього середовища. Для забезпечення надійності результатів застосовується каліброване вимірювальне обладнання з похибкою не більше 0,5 %, а всі дані фіксуються у цифровому форматі для подальшої аналітичної обробки.

Результати експериментальних досліджень аналізуються шляхом побудови графіків залежності споживаної потужності від частоти обертання, характеристик стабілізації тиску та витрати, а також таблиць порівняння режимів енергоспоживання при різних алгоритмах регулювання. Отримані характеристики дозволяють зробити висновок про ступінь енергоефективності системи, її адаптивність до змін навантаження та стійкість роботи у перехідних процесах.

Таким чином, методика проведення експериментальних досліджень передбачає систематичне вивчення динаміки об'єкта керування, перевірку ефективності алгоритмів регулювання, аналіз енергетичних параметрів і визначення оптимальних режимів функціонування системи. Реалізація даної методики забезпечує отримання достовірних даних щодо технічних можливостей розробленої системи, що створює основу для подальшої оцінки її ефективності та

практичного впровадження у промислових умовах.

### 3.2 Результати експериментальних досліджень (порівняння характеристик системи «до» і «після» впровадження)

Результати експериментальних досліджень демонструють суттєве підвищення ефективності енергоспоживання та стабільності технологічного процесу після впровадження системи автоматизації енергозберігаючого регулювання. Порівняння характеристик системи «до» та «після» модернізації здійснюється за сукупністю технічних і енергетичних показників, що відображають динаміку процесів, якість регулювання, рівень енергоспоживання, стабільність параметрів і реакцію системи на зовнішні збурення.

У вихідному стані насосна установка функціонує в режимі постійної швидкості обертання електродвигуна, що зумовлює перевитрати електроенергії, особливо за часткових навантажень, коли фактична потреба у подачі рідини є нижчою за номінальну. У такому режимі спостерігається надлишковий гідравлічний тиск у трубопроводі, підвищений рівень вібрацій, а також нераціональне навантаження на двигун, що призводить до зростання теплових втрат і зниження загального коефіцієнта корисної дії системи. Під час фіксації параметрів до впровадження системи визначається, що середня потужність споживання при номінальній подачі становить 11,2 кВт, тоді як при зниженому навантаженні (приблизно 60 % від номінального) вона зменшується лише до 9,8 кВт, що свідчить про відсутність енергетичної адаптивності привода.

Після впровадження частотно-регульованого електропривода та алгоритму автоматичного регулювання тиску система переходить до роботи з гнучким керуванням швидкістю обертання ротора залежно від фактичної потреби у подачі рідини. Внаслідок цього середня споживана потужність при навантаженні 60 % зменшується до 5,4 кВт, що забезпечує економію електроенергії понад 40 % порівняно з початковим режимом. При цьому знижується рівень шуму і вібрацій, а температура обмоток електродвигуна стабілізується у межах від 60°C до 65 °C замість попередніх від 80°C до 85°C, що підтверджує зменшення теплових втрат і підвищення надійності роботи привода.

Динамічні характеристики системи також зазнають суттєвого покращення. У режимі ручного керування, який застосовується до модернізації, час виходу на стабільний тиск після зміни навантаження становить у середньому від 12 секунд до 15 секунд, а величина перерегулювання досягає від 8% до 10 %. Після впровадження ПД-регулятора з адаптивною корекцією коефіцієнтів час стабілізації зменшується від 4 секунд до 6 секунд, а перерегулювання не перевищує від 2% до 3 %, що свідчить про підвищення точності регулювання та стійкості контуру. У процесі переходу між режимами не спостерігається різких стрибків тиску, що виключає можливість гідроударів у системі та забезпечує плавність зміни витрати.

На графіках залежності тиску та споживаної потужності від частоти обертання ротора спостерігається чітка кореляція між зменшенням швидкості двигуна та скороченням енергоспоживання, при цьому форма кривих підтверджує кубічну залежність потужності від частоти обертання, що узгоджується з теоретичними положеннями гідродинаміки. У системі без частотного регулювання крива енергоспоживання має практично лінійний характер через постійність частоти живлення, що призводить до нераціонального використання енергії.

Під час аналізу коефіцієнта корисної дії визначається, що для базового режиму середній ККД системи становить 74 %, тоді як після впровадження системи автоматичного регулювання цей показник підвищується від 86% до 88 %. Зростання ефективності пояснюється зменшенням механічних втрат, усуненням надлишкових перепадів тиску та зниженням енергетичних перевантажень електродвигуна.

Важливим результатом є також зниження пікових струмів при пуску. У традиційній схемі пуск супроводжується стрибком струму від 6 номінальних значень до 7 номінальних значень, що спричиняє додаткові втрати енергії та прискорений знос обмоток. Після застосування частотного перетворювача пуск відбувається плавно, а максимальний струм не перевищує від 1,5 номінальних значень до 2 номінальних значень, що істотно підвищує довговічність двигуна і зменшує навантаження на електромережу.

Під час дослідження проводиться порівняння стабільності тиску в системі до та після модернізації. У вихідному стані амплітуда коливань тиску становить  $\pm 0,25$  МПа відносно уставки, тоді як у модернізованій системі вона не перевищує  $\pm 0,05$  МПа. Це свідчить про суттєве підвищення точності регулювання та ефективність реалізованого алгоритму керування. Середня абсолютна похибка стабілізації тиску зменшується від 4,8 % до 1,2 %, що забезпечує більш рівномірну роботу технологічного процесу та зменшення втрат у трубопроводі.

Проведений аналіз також демонструє зменшення вібраційних навантажень на механічні вузли насоса. Вібраційна амплітуда у системі до автоматизації становить від 0,12 мм до 0,15 мм, а після впровадження системи регулювання з частотним приводом знижується від 0,04 мм до 0,05 мм, що підтверджує підвищення плавності обертання ротора і рівномірність навантаження на підшипникові вузли. Це безпосередньо впливає на збільшення ресурсу експлуатації обладнання та зниження витрат на технічне обслуговування.

Для оцінки енергетичного ефекту впровадження виконується розрахунок середньої питомої витрати електроенергії на перекачування 1 м<sup>3</sup> рідини. У початковому стані цей показник становить 0,092 кВт·год/м<sup>3</sup>, тоді як після модернізації він знижується до 0,054 кВт·год/м<sup>3</sup>. Таким чином, загальна економія електроенергії за результатами експериментальних вимірювань сягає 41,3 %, що підтверджує ефективність реалізованої системи енергозберігаючого регулювання.

Порівняння результатів експерименту з даними математичного моделювання показує високу ступінь збігу характеристик. Максимальне відхилення між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 5 %, що свідчить про адекватність побудованої моделі та правильність вибору алгоритмів регулювання. Це дозволяє використовувати розроблену модель для подальших оптимізаційних розрахунків і прогнозування енергоспоживання при різних умовах експлуатації.

Отримані результати підтверджують, що впровадження системи автоматизації енергозберігаючого регулювання забезпечує комплексне покращення технічних і експлуатаційних характеристик насосного обладнання.

Система функціонує стабільно в усьому робочому діапазоні, швидко реагує на зміни навантаження, підтримує необхідний технологічний тиск із високою точністю та забезпечує суттєве зниження енергетичних витрат. Крім того, зменшення механічних і теплових навантажень підвищує ресурс роботи обладнання, що створює передумови для довготривалої експлуатації без додаткових втручань і позапланових ремонтів.

Таким чином, результати експериментальних досліджень однозначно підтверджують ефективність розробленої системи автоматизації. Її застосування дозволяє досягати оптимального балансу між стабільністю технологічного процесу, точністю регулювання та енергозбереженням, що робить можливим практичне впровадження даного рішення у промислових умовах з гарантованим економічним ефектом і підвищенням надійності виробничих систем.

### 3.3 Аналіз отриманих результатів і підтвердження ефективності енергозберігаючого регулювання

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень підтверджує високу ефективність розробленої системи автоматизації енергозберігаючого регулювання, яка забезпечує комплексне підвищення енергетичної, технічної та експлуатаційної ефективності роботи промислового обладнання. Оцінювання ефективності здійснюється на основі кількісних і якісних показників, що характеризують динаміку процесів, стабільність регулювання, економію електроенергії, рівень механічних навантажень, а також відповідність отриманих даних теоретичним моделям.

Отримані експериментальні криві свідчать, що після впровадження частотно-регульованого електропривода система демонструє значне покращення показників енергоефективності, зокрема зменшення активної потужності споживання у середньому від 35 % до 45 % при збереженні продуктивності насоса. Цей результат пояснюється оптимізацією швидкості обертання ротора відповідно до фактичного навантаження, що виключає надлишкові втрати енергії у трубопроводі та знижує

гідравлічний опір системи. Залежність споживаної потужності від частоти обертання підтверджує кубічний характер енергетичної функції, що повністю узгоджується з теоретичними законами подібності гідромашин і вказує на правильність реалізованого принципу регулювання.

Порівняння режимів роботи системи до і після автоматизації показує, що у традиційному режимі енергоспоживання залишається практично постійним навіть при зменшенні навантаження, тоді як у модернізованій системі воно знижується пропорційно зменшенню витрати. Це свідчить про формування адаптивного керування, при якому система самостійно коригує частоту обертання електродвигуна залежно від потреби технологічного процесу, забезпечуючи оптимальне співвідношення між продуктивністю і витратами енергії.

Оцінка показників якості регулювання демонструє, що перехідні процеси у системі після впровадження ПД-регулятора характеризуються зменшенням часу стабілізації параметрів майже у три рази, зниженням амплітуди перерегулювання у чотири рази та практичною відсутністю коливань у стаціонарному режимі. Це свідчить про зростання стійкості замкненого контуру, адекватну налаштованість параметрів регулятора та високу точність обчислення керуючих сигналів. Наявність плавних перехідних процесів також підтверджує ефективність використання частотного регулювання для усунення гідравлічних ударів і нерівномірних змін тиску, що раніше призводили до підвищеного зносу елементів насосної системи.

Під час аналізу температурного режиму електродвигуна встановлюється, що у модернізованій системі температура обмоток стабілізується на рівні, нижчому від 20 % до 25 % порівняно з базовим режимом, що свідчить про зменшення струмових перевантажень і теплових втрат. Зниження температури безпосередньо впливає на довговічність ізоляції, зменшує ризик міжвиткових замикань і сприяє підвищенню загального ресурсу експлуатації обладнання.

Значне покращення спостерігається також у вібраційних характеристиках, які є критичними для оцінювання механічної стабільності привода. У результаті автоматизації середня амплітуда вібрацій зменшується утричі, що свідчить про

більш рівномірний розподіл динамічних навантажень і зниження механічного стресу на підшипникові вузли. Це не лише подовжує термін служби обладнання, але й знижує рівень шуму в робочій зоні, що є важливим фактором техногенної безпеки.

Енергетичний баланс системи після модернізації демонструє підвищення загального коефіцієнта корисної дії від 74 % до 88 %, що відображає ефективність використання електричної енергії для створення корисного гідравлічного напору. Це покращення обумовлюється усуненням дросельних втрат, зменшенням гідравлічного опору та зниженням внутрішнього тертя у системі завдяки оптимізації режимів обертання. Зростання ККД є підтвердженням того, що система функціонує у близьких до оптимальних умовах, при яких витрати енергії на подолання опору мінімальні, а вихідна гідравлічна потужність максимальна.

Проведена аналітична оцінка економічного ефекту підтверджує доцільність впровадження енергозберігаючого регулювання. На основі експериментальних даних визначається, що щорічне споживання електроенергії насосною установкою зменшується приблизно від 38 % до 42 %, що забезпечує суттєве скорочення витрат на енергопостачання. При вартості електроенергії на промислових підприємствах навіть незначне зниження споживаної потужності приводить до відчутної економії у річному балансі. Розрахунковий період окупності системи автоматизації становить менше двох років, що підтверджує високу економічну ефективність розробленого рішення.

Порівняння результатів експериментальних досліджень із результатами моделювання в середовищі MATLAB/Simulink підтверджує високу точність теоретичної моделі. Відхилення експериментальних даних від моделювання не перевищує 5 %, що свідчить про адекватність побудованої математичної схеми, правильність вибору параметрів регулятора та коректність опису динамічних процесів у системі. Такий рівень збігу вказує на можливість подальшого використання моделі для прогнозного аналізу енергоспоживання при різних навантаженнях і розроблення оптимізаційних алгоритмів керування.

Отримані результати доводять, що реалізована система автоматизації

відповідає сучасним вимогам промислової енергоефективності. Вона забезпечує стабільне функціонування технологічного обладнання, мінімізує вплив людського фактора, гарантує високу точність підтримання параметрів і сприяє формуванню енергетично збалансованого виробничого процесу. Зниження енергоспоживання поєднується із покращенням технічних характеристик системи, що свідчить про ефективну інтеграцію технічних і програмних рішень у межах автоматизованої структури.

Таким чином, аналіз отриманих результатів підтверджує, що впровадження енергозберігаючого регулювання на основі частотно-регульованого електропривода і адаптивного керування дозволяє забезпечувати оптимальне використання енергетичних ресурсів, підвищувати надійність обладнання та досягати високих показників стабільності технологічних процесів. Отримані дані свідчать про те, що розроблена система може бути рекомендована для широкого впровадження у промислових насосних, компресорних та вентиляційних установках як ефективний засіб підвищення енергоефективності та технологічної стабільності виробничих систем.

### 3.4 Оцінка надійності, стабільності та точності регулювання

Оцінка надійності, стабільності та точності регулювання є ключовим етапом комплексного аналізу функціонування системи автоматизації енергозберігаючого регулювання, оскільки саме ці показники визначають її практичну придатність, довговічність і здатність забезпечувати стабільність технологічних процесів у промислових умовах. Для встановлення рівня надійності системи проводиться аналіз працездатності основних компонентів у різних режимах експлуатації, а також досліджується стійкість алгоритмів керування при зміні зовнішніх і внутрішніх збурень.

У ході експериментальних досліджень визначається, що система з частотно-регульованим приводом зберігає стійке функціонування при зміні навантаження в діапазоні від 30 % до 100 % від номінального значення без ознак автоколивань або

втрати керованості. При різких змінах уставки тиску (до  $\pm 20\%$ ) система забезпечує плавне коригування швидкості обертання ротора без виникнення гідравлічних ударів, що свідчить про високий запас стійкості контуру регулювання. Під час багаторазових циклів пуску та зупинки обладнання не фіксуються відхилення у роботі виконавчих механізмів, а функціональні модулі контролера зберігають стабільність обчислювальних процесів, що підтверджує достатній рівень програмної та апаратної надійності.

Аналіз часових характеристик показує, що середній час реакції системи на зміну контрольованого параметра становить від 0,8 секунди до 1,2 секунди, а період повної стабілізації параметра – не більше 5 секунд, що відповідає високій швидкодії системи керування. Величина перерегулювання не перевищує  $2\%$ , а статична похибка підтримання уставки залишається в межах  $\pm 0,5\%$ , що свідчить про точність і чутливість регулювання. Такі результати демонструють узгодженість дії сенсорних, обчислювальних і виконавчих елементів, що забезпечує надійне відтворення заданих параметрів навіть при наявності шумів у вимірювальних сигналах.

Стійкість системи оцінюється шляхом аналізу амплітудно-частотних і фазово-частотних характеристик у замкненому контурі керування. На основі отриманих експериментальних даних визначається, що запас стійкості за амплітудою становить близько 8 дБ, а за фазою – понад  $55^\circ$ , що відповідає умовам гарантованої стійкості системи навіть при наявності параметричних коливань у межах  $\pm 10\%$  від номінальних значень. Це свідчить про відсутність тенденції до самозбудження або розбалансування контурів при дії випадкових зовнішніх впливів.

Для підтвердження стабільності функціонування здійснюється тривале тестування системи у безперервному режимі роботи протягом 72 годин. За цей період не спостерігається жодних збоїв у роботі програмного забезпечення, пропусків імпульсів у ланцюзі зв'язку або спотворення сигналів. Температура елементів контролера та частотного перетворювача залишається стабільною, що підтверджує ефективність системи охолодження та відсутність теплових

перевантажень. Середній час безвідмовної роботи системи, розрахований за результатами випробувань, перевищує 15 000 годин, що відповідає вимогам промислових стандартів для систем автоматизованого керування технологічними процесами.

Точність регулювання оцінюється шляхом порівняння заданих та фактичних значень тиску, витрати і частоти обертання у різних режимах роботи. Визначається, що середнє квадратичне відхилення контрольованого параметра від уставки не перевищує 0,03 МПа, а максимальна різниця у крайніх режимах становить не більше 0,07 МПа. Це свідчить про високу стабільність алгоритму керування, що забезпечує утримання параметрів у вузькому діапазоні коливань навіть при дії зовнішніх факторів, таких як зміни температури навколишнього середовища або коливання напруги живлення.

Під час аналізу поведінки системи при наявності збурень, створених шляхом штучного введення шумових сигналів у контур зворотного зв'язку, встановлюється, що система зберігає здатність до самостійного відновлення рівноваги без суттєвих відхилень у вихідних параметрах. Коливання тиску після короткочасних збурень (до 10 % від уставки) згасають протягом 2–3 секунд, що свідчить про ефективну роботу компенсуючого механізму та правильний підбір коефіцієнтів регулятора.

Оцінка функціональної надійності системи проводиться також за показниками безвідмовності програмного забезпечення та стійкості комунікаційного каналу. Аналіз журналів подій контролера показує відсутність критичних помилок або зависань під час багатогодинних експериментів. Канал зв'язку між контролером і частотним перетворювачем зберігає стабільну передачу даних зі швидкістю обміну 9600 бод без втрати пакетів або затримок, що підтверджує високу якість цифрової комунікації та синхронність обміну інформацією між компонентами системи.

Середній показник коефіцієнта стабільності системи, визначений за відношенням максимального відхилення параметра до його середнього значення у сталому режимі, становить 0,985, що характеризує систему як високостабільну.

Високий рівень стабільності забезпечується за рахунок гнучкої структури регулятора, що автоматично адаптує свої коефіцієнти відповідно до поточних умов навантаження.

Таким чином, результати проведених випробувань підтверджують, що розроблена система автоматизації характеризується високою надійністю, стабільністю і точністю регулювання технологічних параметрів. Вона здатна забезпечувати безперервну роботу у тривалих циклах без втрати керованості, адекватно реагує на збурення, підтримує параметри з мінімальною похибкою та демонструє високий запас стійкості. Виявлені властивості дозволяють віднести систему до категорії високоефективних енергозберігаючих рішень, придатних для практичного застосування в промислових умовах, де необхідне поєднання точного регулювання, економії енергії та надійного функціонування технологічного обладнання.

### 3.5 Заходи з охорони праці при розробленні та експлуатації системи автоматизації

Забезпечення охорони праці при розробленні та експлуатації системи автоматизації є одним із найважливіших аспектів безпечної організації інженерно-технічної діяльності, оскільки створення та впровадження енергозберігаючих систем пов'язане з використанням електротехнічного, обчислювального та механічного обладнання, що потенційно може створювати небезпечні та шкідливі виробничі фактори. Дотримання вимог безпеки праці спрямовується на попередження нещасних випадків, збереження життя та здоров'я персоналу, а також забезпечення надійної експлуатації системи в промислових умовах.

Під час розроблення системи автоматизації здійснюється комплекс заходів, спрямованих на безпечну організацію праці працівників, які виконують монтаж, налагодження, програмування та технічне обслуговування обладнання. Робочі місця оснащуються ергономічними столами, кріслами та освітленням, що відповідає нормам ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення» [1].

Освітленість робочої поверхні забезпечується на рівні не менше 300 лк, що створює комфортні умови для виконання точних операцій з електронними компонентами. У приміщеннях, де проводяться роботи з комп'ютерною технікою, підтримується оптимальний мікроклімат відповідно до ДСН 3.3.6.042-99, а саме температура повітря в межах від 20 °С до 24 °С та відносна вологість від 40 % до 60 % [2].

Під час монтажу електротехнічного обладнання основними небезпечними факторами є можливість ураження електричним струмом, термічні опіки, механічні травми при роботі з інструментом, а також ураження статичною електрикою. Для запобігання цим ризикам застосовуються технічні заходи електробезпеки, передбачені Правилами улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98) [3]. Усі струмопровідні частини обладнання ізолюються, корпуси приладів та електродвигунів заземлюються, а перед початком роботи проводиться перевірка цілісності захисного контуру заземлення.

При роботі з високовольтними колами застосовуються діелектричні рукавиці, килимки, інструменти з ізольованими ручками, а також переносні заземлення. Усі електротехнічні операції виконуються тільки при знятій напрузі, після оформлення наряду-допуску, що регламентує послідовність дій і відповідальних осіб. Перед початком роботи здійснюється перевірка справності вимірювальних приладів і засобів контролю напруги. Для запобігання електричному пробію між силовими кабелями дотримуються мінімальні допустимі відстані згідно з вимогами ПУЕ.

Особливу увагу приділяється організації безпечної роботи під час експлуатації частотно-регульованого електропривода. Оскільки перетворювачі частоти формують імпульсні напруги високої частоти, застосовується екранування кабелів і правильне заземлення їх оболонок для зменшення рівня електромагнітних перешкод. Персонал, що здійснює налагодження системи, проходить спеціальну підготовку з питань електробезпеки та має кваліфікаційну групу не нижче III згідно з НПАОП 40.1-1.32-01 [4].

У процесі експлуатації системи автоматизації важливим аспектом є

забезпечення безпечних умов роботи обслуговуючого персоналу. Для цього передбачаються технічні та організаційні заходи, серед яких – періодична перевірка ізоляції електромереж, контроль опору заземлення, огляд стану кабельних з'єднань, вентиляторів охолодження та стану корпусів електрообладнання. Проводиться регулярне технічне обслуговування датчиків, контролера та виконавчих механізмів з метою попередження відмов і виникнення небезпечних ситуацій.

Для запобігання пожежам і вибухам у приміщеннях, де розміщується обладнання, дотримуються вимоги Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014) [5]. Електрощитові, шафи керування та стенди оснащуються первинними засобами пожежогасіння — вуглекислотними або порошковими вогнегасниками типу ВВК-2(з) або ВП-5(з), що розміщуються на відстані не більше 20 м від потенційного джерела займання. Додатково передбачається система аварійного відключення електроживлення, яка дозволяє миттєво знеструмити систему у разі виникнення небезпечної ситуації.

Під час роботи з обчислювальною технікою враховуються санітарно-гігієнічні вимоги, визначені ДСанПіН 3.3.2.007-98 [6]. Робочі місця операторів обладнуються моніторами із захисними екранами, відстань від очей до екрана підтримується у межах від 50 см до 70 см, а тривалість безперервної роботи за комп'ютером не перевищує 2 години, після чого здійснюється 15-хвилинна перерва для відпочинку зору.

Важливою складовою системи охорони праці є проведення інструктажів, навчання та перевірки знань персоналу. Перед допуском до роботи всі працівники проходять вступний, первинний, повторний і цільовий інструктажі відповідно до вимог НПАОП 0.00-4.12-05 [7]. Знання з питань охорони праці перевіряються щорічно шляхом тестування та співбесіди.

При виконанні монтажних і налагоджувальних робіт у приміщеннях із можливістю утворення пилу або шкідливих випарів забезпечується ефективна вентиляція відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 [8]. Для захисту органів дихання використовуються фільтрувальні респіратори, а для захисту очей – захисні

окуляри. Робочий персонал забезпечується спецодягом, діелектричним взуттям та засобами індивідуального захисту відповідно до норм Типових галузевих норм безплатної видачі спецодягу та засобів індивідуального захисту.

### 3.6 Висновки до третього розділу

Таким чином, результати проведених випробувань підтверджують, що розроблена система автоматизації характеризується високою надійністю, стабільністю і точністю регулювання технологічних параметрів. Вона здатна забезпечувати безперервну роботу у тривалих циклах без втрати керованості, адекватно реагує на збурення, підтримує параметри з мінімальною похибкою та демонструє високий запас стійкості. Виявлені властивості дозволяють віднести систему до категорії високоефективних енергозберігаючих рішень, придатних для практичного застосування в промислових умовах, де необхідне поєднання точного регулювання, економії енергії та надійного функціонування технологічного обладнання.

Система заходів з охорони праці при розробленні та експлуатації системи автоматизації спрямовується на попередження травматизму, уражень електричним струмом, опіків, пожеж, шкідливих впливів мікроклімату та електромагнітних полів. Реалізація зазначених заходів забезпечує безпечні умови праці для персоналу, підвищує надійність і довговічність обладнання, а також гарантує відповідність процесу розроблення та експлуатації системи чинним нормам технічної безпеки, санітарним і протипожежним вимогам.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження підтверджує доцільність і ефективність впровадження системи автоматизації енергозберігаючого регулювання промислового обладнання, що ґрунтується на використанні частотно-регульованого електропривода та адаптивних алгоритмів керування. Отримані результати свідчать, що розроблена система забезпечує комплексне підвищення енергоефективності, стабільності технологічного процесу та надійності роботи обладнання, що є актуальним завданням сучасної промислової автоматизації в умовах підвищених вимог до раціонального використання енергетичних ресурсів.

У ході теоретичних і експериментальних досліджень визначається, що реалізація частотного регулювання швидкості обертання електродвигуна дозволяє досягати значного скорочення енергоспоживання – у середньому від 35 % до 45 % у порівнянні з традиційними системами із фіксованою швидкістю. Такий ефект зумовлюється оптимізацією подачі енергії відповідно до фактичного навантаження, зменшенням надлишкових гідравлічних втрат і усуненням нераціональних режимів роботи привода. Отримані енергетичні характеристики підтверджують відповідність системи сучасним критеріям енергоощадності та економічної ефективності.

Порівняльний аналіз динамічних властивостей системи до і після впровадження автоматизованого регулювання демонструє суттєве покращення показників стабільності та швидкодії. Час перехідного процесу зменшується утричі, величина перерегулювання не перевищує 2 %, а коливання тиску у стаціонарному режимі залишаються в межах  $\pm 0,05$  МПа, що забезпечує високий рівень точності керування технологічними параметрами. Зменшення тривалості перехідних процесів позитивно впливає на стабільність продуктивності обладнання та мінімізує втрати енергії у періоди зміни навантаження.

Результати випробувань підтверджують, що система автоматизації характеризується високою надійністю та стійкістю. Робота у безперервному режимі протягом тривалого часу не супроводжується відмовами, порушенням

обміну даними або перегрівом компонентів. Запас стійкості за амплітудою та фазою перевищує нормативні межі, що свідчить про здатність системи зберігати функціональну працездатність при дії збурень і випадкових змін навантаження. Експериментально встановлений середній час безвідмовної роботи перевищує 15 000 годин, що відповідає вимогам промислових стандартів.

Високий рівень точності регулювання підтверджується мінімальними відхиленнями фактичних значень тиску та витрати від заданих параметрів. Середньоквадратичне відхилення не перевищує 0,03 МПа, що свідчить про стабільність функціонування алгоритму керування і коректність вибору коефіцієнтів ПД-регулятора. Такий рівень точності дозволяє забезпечувати рівномірність подачі рідини, зменшувати гідравлічні удари та підтримувати оптимальні умови роботи технологічного обладнання.

Аналіз показників енергетичної ефективності доводить, що впровадження системи автоматизації забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії від 74 % до 88 %, що свідчить про більш раціональне перетворення електричної енергії у механічну. Зниження температури обмоток електродвигуна від 20 % до 25 %, зменшення вібраційних навантажень утричі та скорочення пікових струмів під час пуску зумовлюють подовження ресурсу експлуатації привода, зниження рівня зносу механічних вузлів і підвищення загальної надійності системи.

Проведене економічне оцінювання підтверджує, що зниження середньої питомої витрати електроенергії від 0,092 кВт·год/м<sup>3</sup> до 0,054 кВт·год/м<sup>3</sup> забезпечує скорочення загальних витрат на електропостачання приблизно на 40 %. Розрахунковий термін окупності впровадження системи не перевищує двох років, що свідчить про її високу економічну доцільність. Таким чином, впровадження розробленої системи дозволяє одночасно досягати технічної модернізації виробничого процесу та суттєвого економічного ефекту.

Проведені експериментальні дослідження підтверджують адекватність математичної моделі системи, розробленої в середовищі MATLAB/Simulink, а також точність моделювання динамічних процесів у контурі керування. Відхилення між експериментальними і розрахунковими даними не перевищує 5 %, що свідчить про високу точність моделювання.

що доводить коректність теоретичних положень і забезпечує можливість подальшого використання моделі для прогнозування енергоспоживання та оптимізації параметрів регулятора.

З позицій промислової безпеки система автоматизації відповідає вимогам охорони праці та електробезпеки. Технічна реалізація системи включає комплекс захисних заходів, спрямованих на запобігання ураженню електричним струмом, перегріву, механічним травмам і пожежам. Виконання вимог нормативних документів забезпечує безпечні умови праці персоналу та підвищує експлуатаційну надійність системи у виробничих умовах.

Узагальнення результатів дослідження дає підстави стверджувати, що розроблена система автоматизації енергозберігаючого регулювання відповідає сучасним вимогам промислової автоматизації, забезпечує точність підтримання технологічних параметрів, стабільність функціонування, економію енергоресурсів і надійність експлуатації. Реалізована система може бути рекомендована для широкого впровадження у насосних, компресорних і вентиляційних установках промислових підприємств з метою підвищення енергоефективності, зниження експлуатаційних витрат і створення умов сталого, безпечного та економічно обґрунтованого виробництва.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с.
3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 142 с.
4. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. – Київ: Мінрегіон України, 2018. – 56 с.
5. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. – Київ: МОЗ України, 1999. – 22 с.
6. ДСанПіН 3.3.2.007-98. Державні санітарні правила і норми роботи з відеодисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. – Київ: МОЗ України, 1998. – 30 с.
7. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Академічна доброчесність та якість освіти" підготовки магістра, спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [Електронний ресурс] : освітніх програм "Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва", "Комп'ютеризовані та робототехнічні системи" / ХНУРЕ ; розроб. О. І. Филипенко. – Харків, 2024. – 178 с.

8. НПАОП 40.1-1.32-01. Правила безпечної експлуатації електроустановок. – Київ: Держнаглядохоронпраці України, 2001. – 115 с.
9. НПАОП 0.00-4.12-05. Типове положення про навчання з питань охорони праці. – Київ: Держгірпромнагляд України, 2005. – 24 с.
10. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Електроніка телекомунікаційних систем" підготовки магістра, спеціальність 153 - Мікро- та наносистемна техніка [Електронний ресурс] : спеціалізація "Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої" / ХНУРЕ ; розроб. І. М. Бондаренко. – Харків, 2017. – 176 с.
11. НАПБ А.01.001-2014. Правила пожежної безпеки в Україні. – Київ: ДСНС України, 2014. – 178 с.
12. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Автоматизовані технології аналізу та прогнозування" підготовки магістра, спеціальність 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [Електронний ресурс] : освітньої програми «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва» / ХНУРЕ ; розроб. О. І. Филипенко, О. В. Сичова. – Харків, 2024. – 161 с.
13. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). – 7-е вид. – Київ: Мінпаливенерго України, 2006. – 736 с.
14. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни "Автоматизоване управління технологічними процесами" підготовки магістра спеціальності 174 - Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка [Електронний ресурс] : освітньо-професійної програми "Комп'ютеризовані та робототехнічні системи" / ХНУРЕ; розроб. : І. Ш. Невлюдов, М. Г. Стародубцев. – Харків, 2023. – 344 с.
15. Sen P. C. Principles of Electric Machines and Power Electronics. New York : Wiley, 2013. 832 p.
16. Методичні вказівки до виконання розділу "Охорона праці" у випускних роботах ОКР "бакалавр" усіх форм навчання / упоряд.: В. А. Айвазов.

Т. Є. Стиценко., Н. Л. Березуцька ; М-во освіти і науки України, ХНУРЕ. – Харків : ХНУРЕ, 2018. – 28 с.

17. Chapman S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. 5th ed. New York : McGraw-Hill, 2022. 736 p.

18. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. – Київ: Держнаглядохоронпраці України, 1998. – 96 с.

19. Melkebeek J. A. *Electrical Machines and Drives: Fundamentals and Advanced Modelling*. Cham : Springer, 2018. 668 p.

20. Trzynadlowski A. M. *Introduction to Modern Power Electronics*. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2019. 472 p.

21. Типові галузеві норми безплатної видачі спецодягу, спецвзуття та інших засобів індивідуального захисту. – Київ: Міністерство соціальної політики України, 2018. – 214 с.

22. Bose B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. Upper Saddle River : Prentice Hall, 2022. 736 p.

23. Rashid M. H. *Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications*. 4th ed. Boston : Pearson, 2023. 960 p.

24. Невлюдов І.Ш. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипченко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов. – Кривий Ріг : Криворізький коледж НАУ, 2019. 366 с.

25. Божинський С.В., Синявський О.Ю. Підстанції майбутнього: інноваційні технології та перспективи розвитку – Київ: Науковий журнал «Молодий вчений» – Київ, 2023. 60с.

26. Bollinger J. G., Duffie N. A. *Computer Control of Machines and Processes*. Upper Saddle River : Prentice-Hall, 2021. 432 p.