

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

ФЕДОРИШИН РОМАН МИРОНОВИЧ



УДК 681.121/123; 532.57

**ІМПУЛЬСНІ РЕГУЛЯТОРИ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ
КЕРУВАННЯ В ТЕПЛОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ**

05.13.07 – Автоматизація процесів керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету “Львівська політехніка”.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Пістун Євген Павлович,

Національний університет “Львівська політехніка”,
завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Пальчевський Богдан Олексійович,

Луцький національний технічний університет,
професор кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

доктор технічних наук, професор

Максимов Максим Віталійович,

Одеський національний політехнічний університет,
завідувач кафедри комп'ютерних технологій автоматизації

доктор технічних наук, професор

Жученко Анатолій Іванович,

Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, завідувач кафедри технічних та програмних засобів автоматизації

Захист відбудеться 13 травня 2021 р. о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 в Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, Львів, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226, головного навчального корпусу.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 25 березня 2021 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



Вашкурак Ю. З.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Автоматизовані системи керування технологічними процесами (АСКТП) застосовуються у всіх галузях промисловості, включаючи харчову, фармацевтичну, газову промисловість та енергетику. Основними перевагами АСКТП є зниження впливу так званого людського фактору на технологічний процес, мінімізація витрати сировини, покращення якості вихідного продукту і суттєве підвищення ефективності виробництва. На сьогодні керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів залишається проблемою, яка, не зважаючи на значну кількість публікацій, присвячених питанням автоматизації технологічних процесів, залишається недостатньо дослідженою. Саме тому вирішення окресленої проблематики сприятиме не лише покращенню якісних та кількісних показників процесу автоматичного керування технологічним обладнанням, а й підвищенню ефективності роботи підприємств, зокрема в галузі теплової енергетики.

У різних галузях промисловості існує проблема створення систем автоматичного керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів. Проведені раніше дослідження стосуються, в основному, способів, методів та технологій промислової автоматизації. На даний час при виконанні робіт з налагодження систем автоматичного керування виникає необхідність підвищити надійність функціонування імпульсних регуляторів та збільшити часовий ресурс роботи їх вихідних контактів, підвищити якість фільтрування з невеликою динамічною похибкою при обробці вхідних аналогових сигналів автоматичних регуляторів, підвищити надійність, ефективність та продуктивність роботи кульових барабанних млинів при розмелюванні вугілля на ТЕС, забезпечити ефективне функціонування теплогенеруючого обладнання, що є можливим лише за умов наявності точного обліку енергоносіїв.

Вирішення даної проблеми є актуальним, особливо в розрізі необхідності підвищення енергоефективності роботи технологічного обладнання, а також зменшення затрат на обслуговування промислових систем автоматизації.

Таким чином, проблема керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів є актуальною і набуває особливо важливого значення для підвищення ефективності та надійності роботи як технологічного обладнання, так і пристроїв систем автоматизації для теплових об'єктів, для процесу розмелювання вугілля за допомогою кульових барабанних млинів на ТЕС, а також для теплогенеруючого обладнання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертації відповідає науковому напрямку кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету «Львівська політехніка»: «Методи та засоби обліку енергоносіїв та автоматизації технологічних процесів» (затверджено на засіданні Вченої ради Інституту енергетики та систем керування Національного університету «Львівська політехніка», протокол № 13 від 18.06.2014 р.).

Тематика дисертаційної роботи пов'язана з виконанням науково-дослідних робіт Національного університету “Львівська політехніка”, зокрема:

- “Дослідження схем імпульсних регуляторів у промислових системах автоматизації”, науково-дослідна робота АТХП-5, номер державної реєстрації 0116U004098, 2016 – 2017 рр., відповідальний виконавець (автором розроблено класифікацію схем автоматичних регуляторів, проаналізовано схеми імпульсних регуляторів, розроблено математичну модель нелінійного теплового об'єкта і виконано моделювання та аналіз перехідних процесів у системі автоматичного регулювання з нелінійним об'єктом із застосуванням різних імпульсних регуляторів);
- “Розробка системи автоматизації та оптимізації кульових барабанних млинів”, проект UKE1-9077-LV-12 Фонду цивільних досліджень та розвитку США (CRDF), 2012 р., відповідальний виконавець (автором розроблено функціональну схему автоматизації кульового барабанного млина та методику діагностики стану кульового барабанного млина у процесі розмелювання для підвищення надійності його роботи);
- “Розробка системи автоматизації та оптимізації кульових барабанних млинів”, договір М/3-2012, номер державної реєстрації 0112U005018, 2012 р., відповідальний виконавець (автором розроблено математичну модель кульового барабанного млина та алгоритм управління роботою млина для оптимізації його завантаженості);
- “Встановлення та усунення додаткових похибок вимірювання витрати природного газу на ділянках зі змінними параметрами потоку”, грант Львівської політехніки для молодих учених б/ГЛП, номер державної реєстрації 0109U001169, 2009 р., керівник гранту (автором розроблено методику визначення та усунення додаткових похибок вимірювання витрати природного газу на ділянках зі змінними параметрами потоку);
- “Підвищення точності вимірювання витрати та кількості енерговмісних сумішей газів”, грант президента України для підтримки наукових досліджень молодих учених GP/F32/059, номер державної реєстрації 0111U005376, 2011 р., керівник гранту (автором розроблено методологію врахування впливу зміни температури потоку на точність вимірювання витрати та кількості енерговмісних сумішей газів в умовах роботи систем обліку коксового та доменного газу, а також розроблено математичну модель поправкового коефіцієнта на притуплення вхідного канта діафрагми для зменшення систематичних похибок вимірювання витрати та кількості енерговмісних сумішей газів в умовах роботи систем обліку коксового та доменного газу);
- “Обстеження вузлів обліку природного газу в системі «Молдоватрансгаз»”, міжнародний договір 1541, 2011 – 2012 рр., відповідальний виконавець (автором виконано технічну експертизу вузлів обліку природного газу та розроблено заходи для підвищення точності вимірювання витрати та кількості природного газу методом змінного перепаду тиску);

- “Підвищення точності систем обліку природного газу з метою його економного споживання”, держбюджетна тема ДБ/КСО, номер державної реєстрації 0115U000440, 2015 – 2016 рр., відповідальний виконавець (автором розроблено класифікацію систем вимірювання витрати та кількості середовищ на базі лічильників газу в побутовому секторі та в промисловості, досліджено вплив додаткових похибок вимірювання температури газу на точність обліку газу, розроблено рекомендації та заходи для мінімізації додаткових невизначеностей об’єму газу, вимірюваного за допомогою систем обліку на основі лічильників);
- “Підвищення точності обліку природного газу на теплогенеруючих об’єктах”, науково-дослідна робота АТХП-3, номер державної реєстрації 0114U001231, 2014 р., керівник науково-дослідної роботи (автором розроблено математичну модель похибки вимірювання об’єму газу, зумовленої інерційністю термоперетворювача, математичну модель теплообміну між потоком газу та корпусом роторного лічильника газу, а також розроблено заходи для підвищення точності вимірювання витрати і кількості природного газу на теплогенеруючих об’єктах).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є вирішення проблеми ефективного та надійного керування нелінійними об’єктами за допомогою імпульсних регуляторів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати схеми імпульсних регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії, та визначити основні структурні елементи, параметри налаштування та властивості цих схем;
- виконати аналіз існуючих класифікацій автоматичних регуляторів та розробити нову класифікацію з врахуванням закону регулювання, типу вихідного сигналу регулятора та типу керуючого впливу на об’єкт регулювання;
- виконати моделювання та аналіз перехідних процесів для схем імпульсних регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії;
- виконати аналіз алгоритмів широтно-імпульсної модуляції у складі автоматичного регулятора для керування тепловим об’єктом та розробити удосконалений алгоритм ШІМ для усунення брязкоту вихідного релейного контакту;
- розробити методику розрахунку оптимального фільтра аналогового вхідного сигналу автоматичного регулятора;
- виконати експериментальне дослідження теплового об’єкта (електрична піч) та розробити його математичну модель;
- проаналізувати кульовий барабанний млин як об’єкт керування, дослідити перехідні процеси у ньому та розробити математичну модель КБМ;
- проаналізувати алгоритми керування роботою кульового барабанного млина для розмелювання вугілля та розробити удосконалений алгоритм автоматичного керування роботою КБМ;

- дослідити вплив інерційності термоперетворювача на точність вимірювання витрати і кількості природного газу в імпульсних режимах роботи системи обліку;
- розробити математичну модель похибки, зумовленої теплообміном між потоком природного газу та корпусом лічильника газу, а також розробити заходи для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

Об'єктом дослідження є системи керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів у тепловій енергетиці.

Предметом дослідження є ефективність технологічних процесів з нелінійними об'єктами, керування якими здійснюється за допомогою імпульсних регуляторів у тепловій енергетиці.

Методи дослідження. Дослідження систем автоматичного керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів проводилися теоретично та експериментально з використанням програмованих логічних контролерів та персональних комп'ютерів. Під час експериментального дослідження нелінійних об'єктів застосовувались методи статистичного опрацювання експериментальних даних. При розробленні математичної моделі теплового об'єкта на основі отриманих експериментальних даних застосовувались апроксимаційні методи, зокрема метод найменших квадратів. Використано теорію математичного моделювання і теорію оптимального керування для розроблення та дослідження математичних моделей нелінійних об'єктів та для пошуку оптимальних значень параметрів налаштування автоматичного регулятора. Для розрахунку числових значень параметрів налаштування автоматичного регулятора застосовано метод розширених частотних характеристик на базі критерію стійкості Найквіста. Розв'язання оптимізаційної задачі пошуку оптимальних значень параметрів налаштування автоматичного регулятора, що забезпечує мінімум другої інтегральної оцінки, проводилося методом Фібоначчі. У ході дослідження похибок автоматизованих систем обліку природного газу, зокрема похибок вимірювання температури газу внаслідок інерційності термоперетворювача та теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника газу, застосовано теорію теплообміну з врахуванням явищ теплопровідності, конвекції та випромінювання, а також теорію подібності. Розроблення заходів для усунення впливу температурних умов протікання газу на точність вимірювання його витрати та об'єму здійснювалось із застосуванням теорії вимірювань та теорії інваріантності. Дослідження математичних моделей та систем керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів виконувалося із застосуванням сучасних програмних продуктів: Step 7, U90 Ladder, Alfa 2.0, UnityProXL, InTouch Wonderware, Matlab, Simulink.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що:

- запропоновано класифікацію схем автоматичних регуляторів, в основі якої лежить ієрархічна залежність ознак класифікації, що дало можливість запропонувати нові схеми елементів контура регулювання;
- вперше розроблено показники точності для кількісної оцінки якості роботи імпульсного регулятора з виконавчим механізмом, а саме середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення, що дало можливість на основі виконаного моделювання визначити якість перехідних процесів під час роботи імпульсного регулятора з виконавчим механізмом;
- розроблено удосконалений алгоритм широтно-імпульсної модуляції у складі автоматичного регулятора для керування тепловим об'єктом, який полягає у введенні додаткового компаратора для порівняння вихідного сигналу інтегратора із зміщеним сигналом завдання шпаруватості, що забезпечило усунення високочастотних спрацювань вихідного релейного контакту та підвищення надійності його роботи;
- вдосконалено методику розрахунку оптимального фільтра аналогового вхідного сигналу регулятора на основі інтегрального критерію оптимальності, що забезпечує високу якість процесу фільтрування при незначній динамічній похибці профільованого сигналу;
- розроблено математичну модель теплового об'єкта, яка враховує нелінійну поведінку об'єкта, зокрема різну динаміку при нагріванні та при охолодженні, що дає можливість виконувати розрахунок автоматичного регулятора та моделювання перехідних процесів у системі керування нелінійним тепловим об'єктом;
- розроблено математичну модель кульового барабанного млина у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь та виконано перевірку адекватності моделі на основі отриманих результатів експериментального дослідження, що дає можливість виконувати розрахунок регулятора та моделювання перехідних процесів у системі керування кульовим барабанним млином;
- уточнено математичну модель похибки вимірювання об'єму природного газу, внаслідок інерційності термоперетворювача, яка дає можливість визначати вплив динамічних характеристик каналу вимірювання температури потоку на точність системи обліку в імпульсних режимах протікання газу;
- на основі кореляційної залежності між лінійним коефіцієнтом теплопередачі та еквівалентною довжиною прямолінійної ділянки трубопроводу, розроблено математичну модель похибки вимірювання температури, що забезпечує

можливість визначати вплив теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника на точність обліку природного газу.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- запропонована класифікація схем автоматичних регуляторів забезпечує краще розуміння відмінності між позиційними, аналоговими та імпульсними регуляторами та їх місця серед інших регуляторів, а також дає можливість спростити завдання вибору та аналізу схем автоматичних регуляторів для керування технологічними об'єктами;
- удосконалений алгоритм широтно-імпульсного модулятора у складі автоматичного регулятора для керування тепловим об'єктом забезпечує підвищення надійності та збільшення часового ресурсу роботи вихідних релейних контактів шляхом усунення такого небажаного явища як високочастотне спрацювання контакту (брязкіт контакту);
- оптимальний фільтр аналогового сигналу, розрахований згідно запропонованої методики, дає можливість мінімізувати вплив шуму на процес регулювання, а також забезпечує високу якість процесу фільтрування при незначній динамічній похибці профільованого сигналу;
- запропоновано комбінований спосіб визначення сталих часу для математичної моделі теплового об'єкта (електрична піч), відповідно до якого перша стала часу визначається згідно чисельного способу наближення, для якого похибка є найменшою, а друга стала часу – згідно графоаналітичного; таким чином забезпечується адекватний опис поведінки двоємнісного об'єкта із задовільною точністю;
- розроблена математична модель теплового об'єкта була реалізована у програмованому логічному контролері для імітації об'єкта регулювання, що дало можливість виконати моделювання та аналіз перехідних процесів у системі керування нелінійним тепловим об'єктом за допомогою різних схем автоматичного регулятора, на основі чого було вибрано схему, яка забезпечує найкращу якість перехідних процесів;
- розроблена математична модель кульового барабанного млина була застосована для розрахунку параметрів налаштування автоматичного регулятора та розробки алгоритму керування кульовим барабанним млином для забезпечення максимальної розмелювальної продуктивності вугільного млина;
- розроблений алгоритм автоматичного керування кульовим барабанним млином був впроваджений на Бурштинській тепловій електростанції, що забезпечило економію електроенергії, яка витрачається для розмелювання вугілля, на 15% та підвищило маневреність парових котлів;

- на підставі розроблених математичних моделей для визначення додаткових похибок вимірювання витрати та об'єму природного газу, зумовлених інерційністю термоперетворювача та теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника, можна виявляти дисбаланси у системах постачання природного газу;
- розроблені рекомендації для усунення впливу температурних умов протікання природного газу на точність вимірювання його витрати та об'єму забезпечують підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах та можуть бути застосовані під час проектування та експлуатації вказаних систем обліку.

Особистий внесок здобувача. Усі теоретичні та практичні результати, викладені у роботі, одержані автором особисто. У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належать: [1]-[4],[11]-[13],[29],[30] – розробка математичної моделі кульового барабанного млина та алгоритму управління роботою млина для оптимізації його завантаженості; [5] – огляд існуючих класифікацій автоматичних регуляторів та розробка нової класифікації схем автоматичних регуляторів; [6] – аналіз схем імпульсних регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії та моделювання їх динамічних характеристик; [14] – експериментальні дослідження перехідних процесів нелінійного теплового об'єкта керування та розробка його математичної моделі; [15] – аналіз алгоритмів широтно-імпульсної модуляції у складі автоматичного регулятора для керування тепловим об'єктом, розробка удосконаленого алгоритму ШІМ для усунення брязкоту вихідного релейного контакту, розробка методики вибору періоду імпульсів ШІМ; [16] – розробка методики розрахунку оптимального фільтра аналогового вхідного сигналу автоматичного регулятора; [17]-[22],[31] – розробка методики визначення та усунення додаткових похибок вимірювання витрати природного газу на ділянках зі змінними параметрами потоку; [7],[23],[32] – розробка математичної моделі похибки вимірювання об'єму природного газу, зумовленої інерційністю термоперетворювача в імпульсних режимах протікання газу; [24]-[27],[33] – дослідження теплообмінних процесів у системах обліку природного газу, розробка математичної моделі теплообміну між потоком газу та корпусом роторного лічильника газу; [8]-[10],[28],[34] – дослідження точності систем обліку природного газу, розробка методики врахування та усунення впливу температурних умов протікання природного газу на точність вимірювання його витрати та кількості на теплогенеруючих об'єктах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи доповідались та обговорювались на конференціях:

- XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління “Автоматика / Automatics – 2011” – Львів, 2011 р.
- 5-та, 6-та, 7-ма Всеукраїнська науково-технічна конференція “Вимірювання витрати та кількості газу”, м. Івано-Франківськ, 2007 р., 2009 р., 2011 р.
- 19-ий, 21-ий, 22-ий, 23-ій, 31-ий Міжнародний симпозиум ДАААМ “Розумне виробництво та автоматизація” (DAAAM International Symposium “Intelligent Manufacturing and Automation”), 2008 р., 2010 р., 2011 р., 2012 р., 2020 р., м. Відень, Австрія.
- 15-та, 16-та Міжнародна конференція “Сенсори та вимірювальні системи” (“Sensors and Measuring Systems”), м. Нюрнберг, Німеччина, 2010 р., 2013 р.
- VII Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія та вимірювальна техніка”. - Харків. – 2010 р.
- XIII, XVI Форум енергетиків (GRE Forum Energetyków), м. Ополе, Польща, 2012 р., 2018 р.
- 8-ий міжнародний симпозиум з вимірювання витрати рідин (ISFFM), м. Колорадо Спрінгс, Колорадо, США, 2012 р.
- 16-та міжнародна конференція з витратометрії “Flomeko-2013”, м. Париж, Франція, 2013 р.
- Міжнародна конференція з моделювання потоків рідин (CMFF’15), м. Будапешт, Угорщина, 2015 р.
- Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України “Облік природного газу та метрологія”, Львів, 2017 р.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 91 наукова праця, з яких 1 колективна монографія, 9 публікацій у виданнях, включених у бази даних Scopus та Web of Science, 18 статей у наукових фахових виданнях України, 6 статей у наукових періодичних виданнях інших держав, 55 тез доповідей на всеукраїнських та міжнародних науково-практичних конференціях та 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з анотації, вступу, п’яти розділів, висновків, переліку літературних джерел, додатків та має 266 сторінок основного тексту. Робота проілюстрована 165 рисунками, включає 38 таблиць, перелік літературних джерел із 309 найменувань та 2 додатки. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 368 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дано загальну характеристику дисертаційної роботи. Розкрито суть та стан науково-технічної проблеми – керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів з метою підвищення ефективності та надійності роботи як технологічного обладнання, так і пристроїв систем автоматизації. Обґрунтовано актуальність теми, на підставі чого сформульовані мета та основні завдання дослідження. Висвітлено наукову новизну і практичне значення одержаних результатів, подано відомості про особистий внесок здобувача, апробацію результатів роботи та наявні публікації.

В першому розділі виконано огляд існуючих схем імпульсних ПД-регуляторів, проаналізовано конфігурації цих схем і параметри їх налаштування. Запропоновано нову класифікацію схем автоматичних регуляторів.

Імпульсний регулятор – це автоматичний регулятор, перехідна характеристика якого має вигляд імпульсів. Імпульсні ПД-регулятори застосовуються в системах автоматичного регулювання у таких двох випадках: 1) для керування виконавчим механізмом інтегруючої дії; 2) для керування нагрівальним елементом. У першому випадку вихідний сигнал регулятора є біполярним (імпульс “більше” / імпульс “менше” / “нуль”). У другому випадку вихідний сигнал регулятора є уніполярним (“включено”/“виключено”), і керування нагрівальним елементом здійснюється шляхом зміни шпаруватості імпульсного сигналу.

Для керування виконавчим механізмом інтегруючої дії застосовують імпульсний ПД-регулятор, який може бути реалізований на базі таких схем:

- схема імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням (рис.1);
- схема ПД-регулятора з диференціатором та ШІМ (рис.2);
- схема ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем (рис.3);
- схема ПІ-регулятора з генератором імпульсів (рис.4).

Остання схема може бути застосована для реалізації імпульсного ПД-регулювання при застосуванні додаткового диференціатора розузгодження.

У схемі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням (рис.1) вихідний сигнал формується за допомогою трипозиційного реле, охопленого від'ємним зворотним зв'язком з аперіодичною ланкою першого порядку. Для введення диференціальної складової, аперіодичну ланку реалізують у вигляді інтегральної ланки, охопленої жорстким від'ємним зворотним зв'язком. На виході інтегральної ланки встановлено суматор, на який поступає продиференційований сигнал розузгодження. Сигнал розузгодження проходить подвійне диференціювання: перше – через блок реальної диференціальної ланки зі сталою часу T_d , а друге – через інтегральну ланку зі сталою часу $T_{ВЗЗ}$, яка є у від'ємному зворотному зв'язку відносно продиференційованого сигналу розузгодження. Така схема імпульсного регулятора реалізована в електронному регулюючому блоці Р27 комплексу технічних засобів “Каскад-2”.

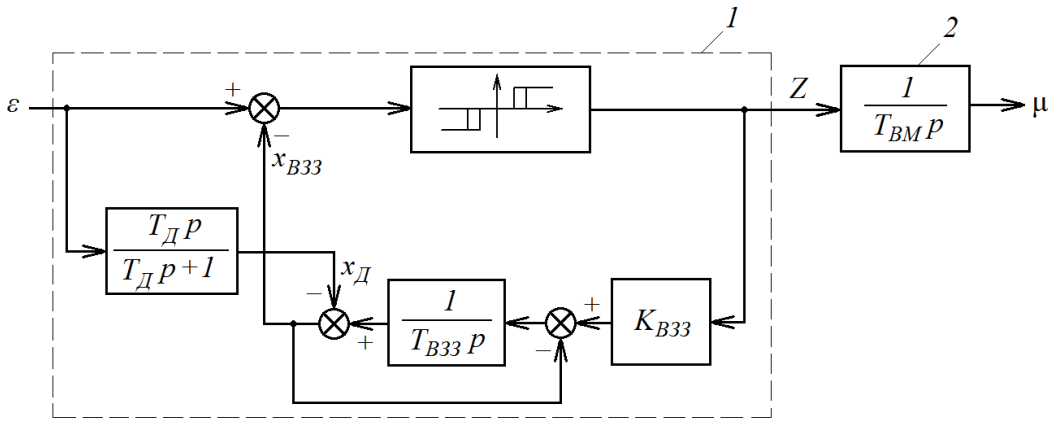


Рис.1. Структурна схема імпульсного ПІД регулятора з подвійним диференціюванням (1) та з виконавчим механізмом (2).

Другий варіант реалізації імпульсного ПІД-регулятора для керування виконавчим механізмом інтегруючої дії полягає у застосуванні ПІД-регулятора з диференціатором та трипозиційним широтно-імпульсним модулятором (рис.2). Аналоговий вихідний сигнал ПІД-регулятора (Y) проходить через диференціатор і таким чином реалізується ПІД-функція передачі. Продиференційований вихідний сигнал аналогового ПІД-регулятора ($\gamma = Y'$) задає шпаруватість імпульсного сигналу на виході ШІМ. Широтно-імпульсний модулятор складається з послідовного з'єднання інтегральної ланки та трипозиційного реле, які охоплені від'ємним жорстким зворотнім зв'язком, і таке з'єднання реалізує операцію пропорційного перетворення. Таким чином вихідний сигнал аналогового ПІД-регулятора проходить через такі перетворення – диференціювання (в диференціаторі), пропорційне перетворення (у ШІМ) та інтегрування (у виконавчому механізмі). Розглянутий принцип реалізації імпульсного ПІД-регулятора застосований у мікропроцесорному регуляторі ПРОТАР.

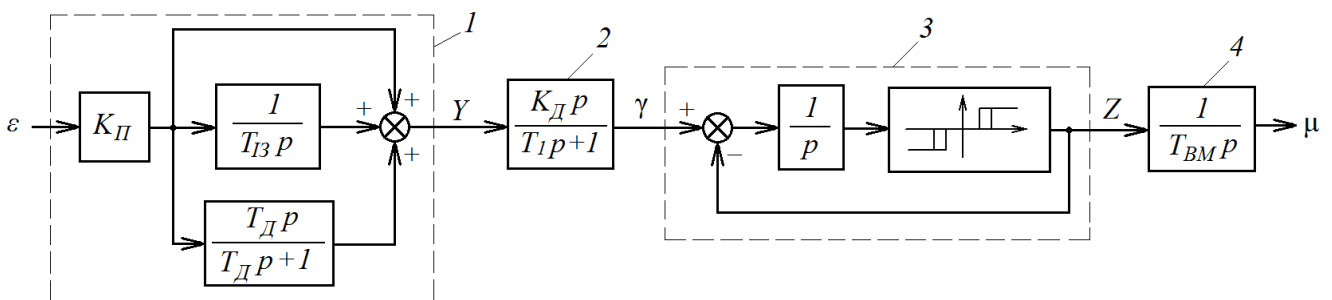


Рис.2. Структурна схема ПІД-регулятора (1) з диференціатором (2), трипозиційним широтно-імпульсним модулятором (3) та виконавчим механізмом (4).

Імпульсне ПІД-регулювання може бути реалізоване і за допомогою схеми ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем (рис.3). Згідно цієї схеми вихідний сигнал аналогового ПІД-регулятора (Y) поступає на трипозиційне реле, охоплене від'ємним зворотним зв'язком з інтегральною ланкою. Таке з'єднання ланок реалізує функцію диференціювання. Вихідний сигнал аналогового ПІД-регулятора

проходить через дві взаємно обернені операції – диференціювання в імпульсному перетворювачі та інтегрування у виконавчому механізмі і, як наслідок, відбувається пропорційне перетворення вихідного сигналу аналогового ПД регулятора (Y) у положення виконавчого механізму (μ). Схема ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем реалізована у багатьох сучасних мікропроцесорних локальних регуляторах, зокрема і в регуляторі SIPART DR20 фірми Siemens.

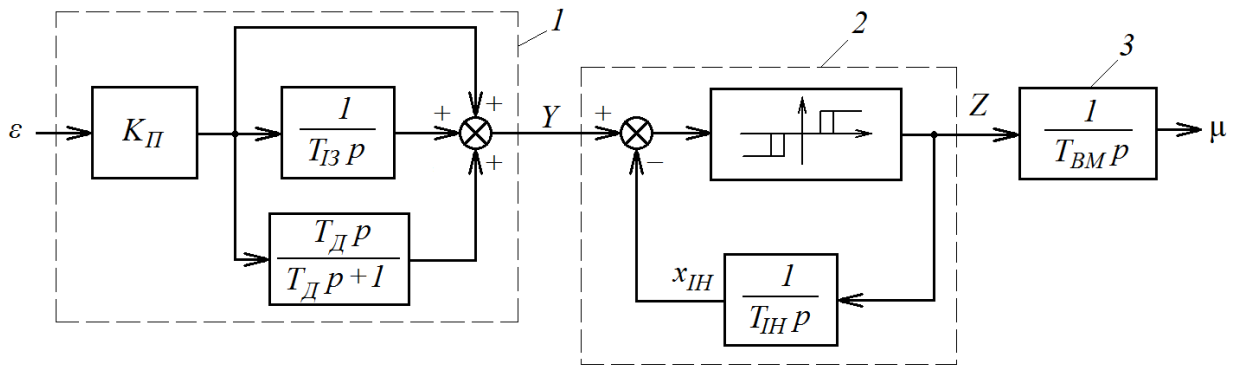


Рис.3. Структурна схема ПД-регулятора (1) з імпульсним перетворювачем (2) та виконавчим механізмом (3).

Ще один спосіб реалізації імпульсного регулятора полягає у застосуванні схеми з генератором імпульсів (рис.4). Ця схема є модифікованим варіантом схеми регулятора з імпульсним перетворювачем (рис.3) і вона є реалізована у функціональному блоці FB42 “CONT_S” контролера SIMATIC S7 фірми Siemens.

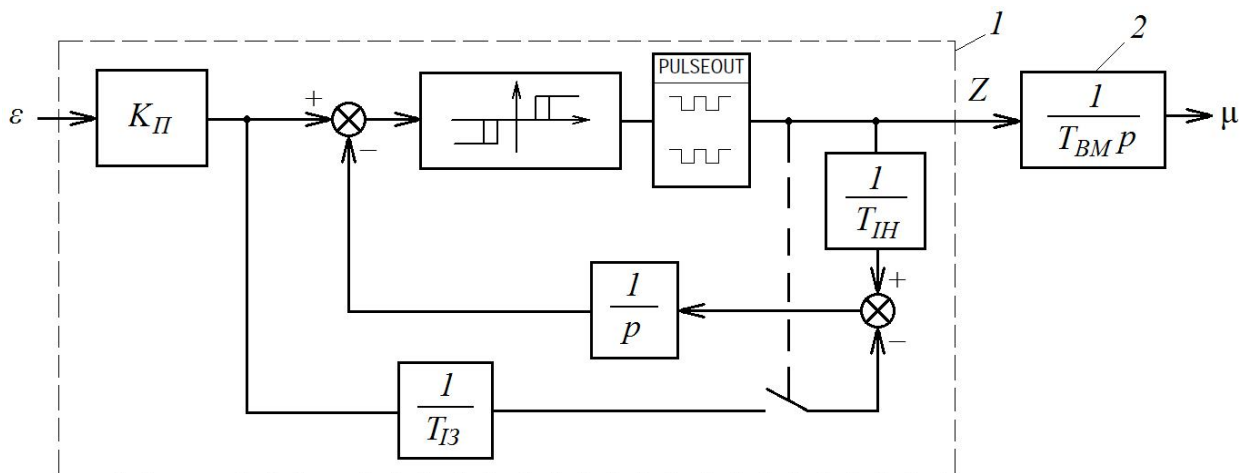


Рис.4. Структурна схема ПІ-регулятора з генератором імпульсів (1) та ВМ (2).

Для кращого розуміння відмінності між позиційними, аналоговими та імпульсними регуляторами, а також їх місця серед інших регуляторів запропоновано нову класифікацію схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання. Відповідно до розробленої класифікації канал регулювання розглядається як частина системи автоматичного регулювання, що складається з автоматичного регулятора та проміжної

ланки між регулятором та об'єктом регулювання. Схеми автоматичних регуляторів з каналом регулювання класифіковано за такими трьома ознаками: тип закону регулювання; тип вихідного сигналу автоматичного регулятора; тип керуючого впливу на об'єкт регулювання. Особливістю розробленої класифікації є те, що ознаки класифікації розміщено в ієрархічному порядку (див.рис.5). Розглядаються різні типи керуючого впливу на об'єкт регулювання для різних типів вихідного сигналу автоматичного регулятора. Різні типи вихідного сигналу автоматичного регулятора розглядаються для різних типів закону регулювання. Введено умовну нумерацію схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання від 1 до 8. Ці схеми представлені на рис.6-13.

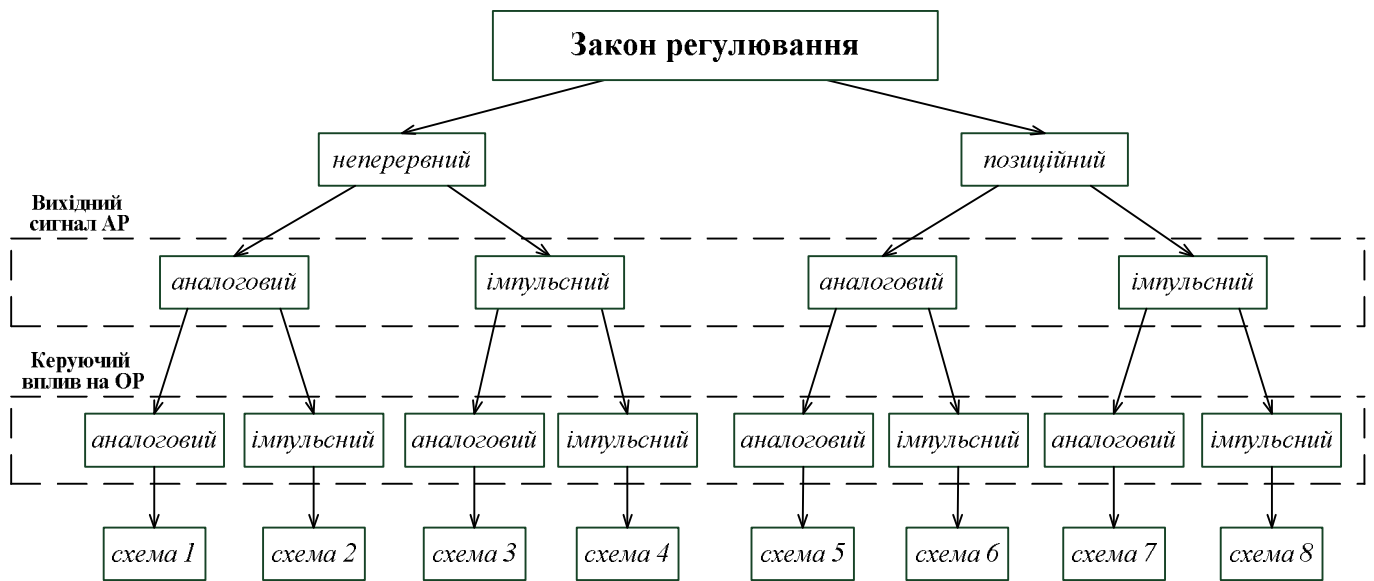


Рис.5. Розроблена класифікація схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання.

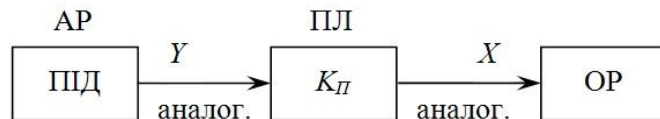


Рис.6. Схема 1: аналоговий ПД-регулятор та ВМ пропорційної дії.

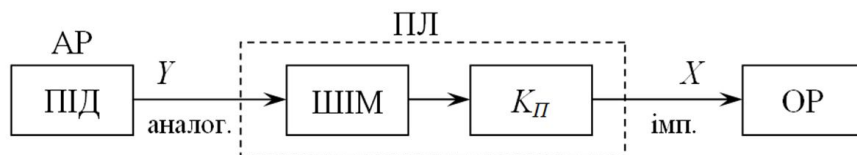


Рис.7. Схема 2: аналоговий ПД-регулятор та ШІМ з підсилювачем.

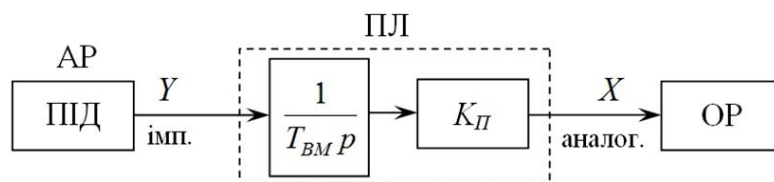


Рис.8. Схема 3: імпульсний ПД-регулятор та ВМ інтегруючої дії з РО.

У даній роботі значна увага приділена дослідженню схеми 3 згідно розробленої класифікації. Із врахуванням різних схем імпульсних ПД-регуляторів, їх умовно можна пронумерувати наступним чином: схема 3.1 – імпульсний ПД-регулятор з подвійним диференціюванням; схема 3.2 – ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ; схема 3.3 – ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем; схема 3.4 – ПІ-регулятор з генератором імпульсів.

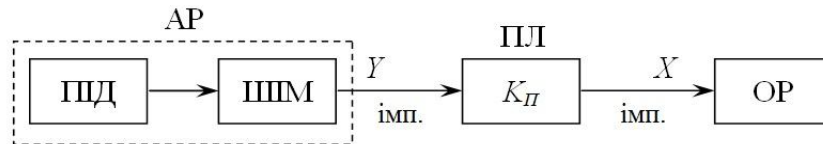


Рис.9. Схема 4: ПД-регулятор з ШІМ та підсилювач.

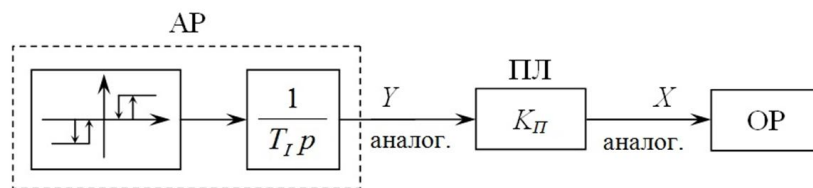


Рис.10. Схема 5: позиційний регулятор з інтегратором та підсилювач.

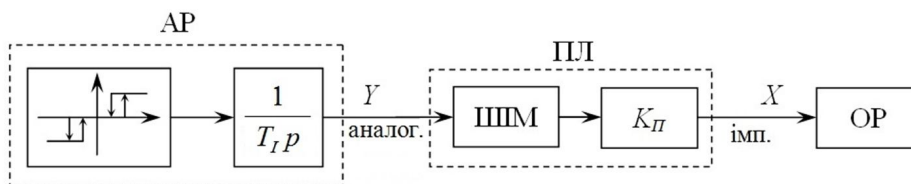


Рис.11. Схема 6: позиційний регулятор з інтегратором та ШІМ з підсилювачем.

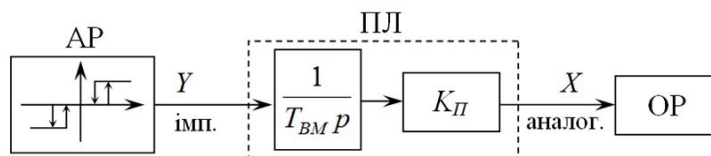


Рис.12. Схема 7: позиційний регулятор та ВМ інтегруючої дії з РО.

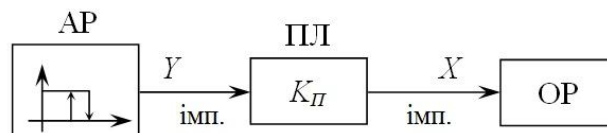


Рис.13. Схема 8: позиційний регулятор та підсилювач.

Слід зазначити, що схеми 5 та 6 як такі були відсутні. Проте, для заповнення прогалини у правій частині розробленої класифікації (рис.5) було запропоновано трипозиційне реле з інтегратором для забезпечення позиційного закону регулювання з аналоговим вихідним сигналом регулятора. Таким чином синтезовано нові схеми автоматичного регулятора з каналом регулювання.

У другому розділі досліджено точність імпульсних ПД-регуляторів, представлено удосконалений алгоритм широтно-імпульсної модуляції в імпульсному ПД-регуляторі для керування тепловим об'єктом та розроблено методику розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу на вході автоматичного регулятора.

Для кількісної оцінки точності роботи імпульсного регулятора з виконавчим механізмом пропонується ввести такі три показники: середнє абсолютне відхилення (Δ), середньоквадратичне відхилення (σ) та середній час запізнення ($\Delta\tau$) перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом відносно перехідної характеристики ідеального аналогового регулятора. Розрахунок цих показників точності пропонується виконувати так:

$$\Delta = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\mu(t) - Y(t)) dt; \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\mu(t) - Y(t))^2 dt}; \quad (2)$$

$$\Delta\tau = \frac{1}{\mu(t_2) - \mu(t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (\mu(t) - Y(t)) dt, \quad (3)$$

де μ – положення виконавчого механізму; Y – вихідний сигнал аналогового регулятора; t – час; t_1 і t_2 – межі інтегрування.

Дослідження точності імпульсних ПД-регуляторів виконано шляхом комп'ютерного моделювання. Результати моделювання для схеми імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням (схема 3.1 згідно класифікації) у режимі ПІ-закону регулювання представлено на рис. 14, а у режимі ПД-закону – на рис. 15.

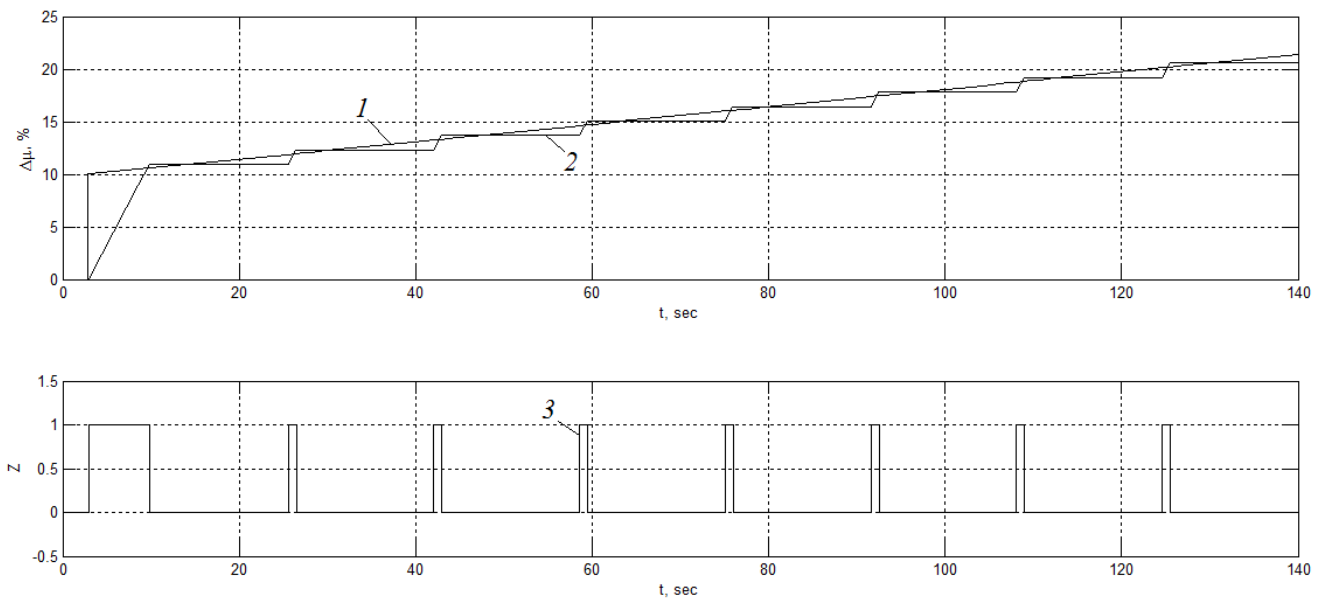


Рис.14. Перехідні характеристики ідеального аналогового регулятора (1), імпульсного регулятора з ВМ (2) та вихідний сигнал імпульсного регулятора (3) для ПІ-закону.

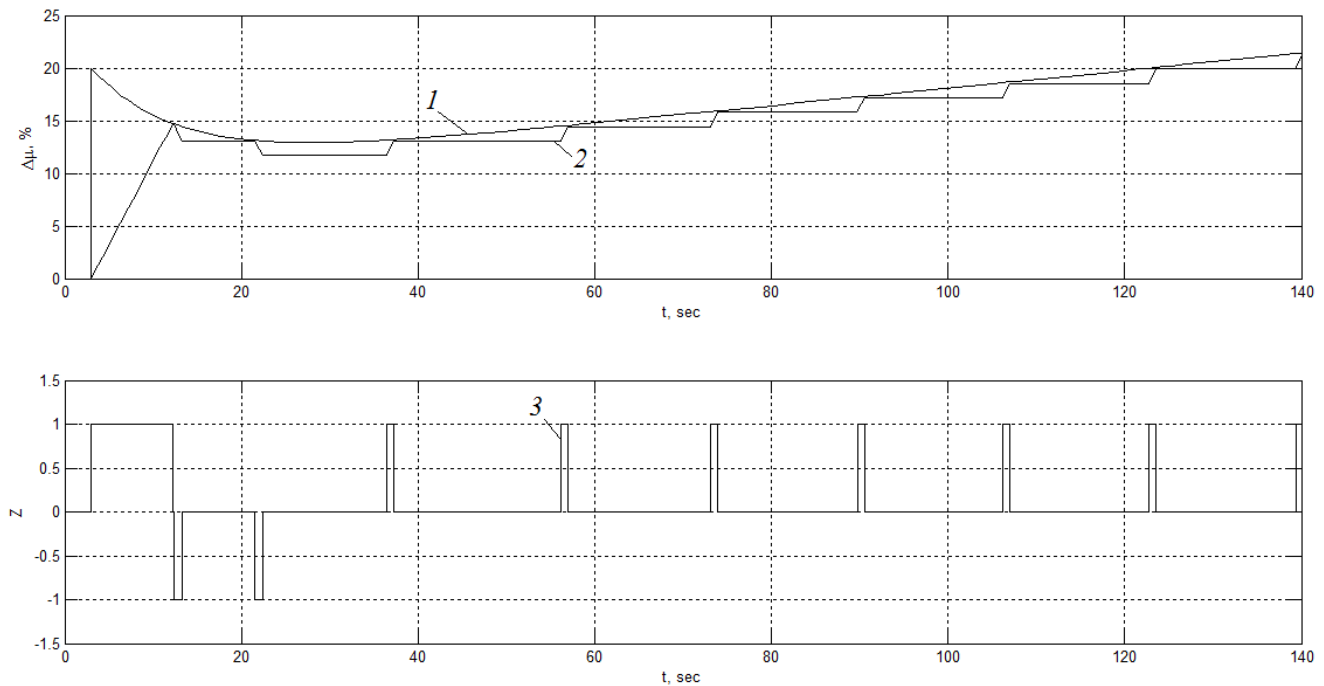


Рис.15. Перехідні характеристики ідеального аналогового регулятора (1), імпульсного регулятора з ВМ (2), та імпульсний вихідний сигнал регулятора (3) для ПІД-закону.

Моделювання виконано для усіх чотирьох схем імпульсного регулятора при різних величинах збурення та налаштуваннях схем. Результати розрахунку показників точності представлені у табл. 1. На основі отриманих результатів встановлено, що найкращу точність забезпечує схема 3.3 – ПІД-регулятор з імпульсним перетворювачем.

Таблиця 1

Порівняння точності роботи різних схем імпульсних регуляторів

Назва схеми	Δ , %	σ , %	$\Delta\tau$, с
Імпульсний ПІД-регулятор з подвійним диференціюванням (схема 3.1)	-0,60	0,62	7,43
ПІД-регулятор з диференціатором та ШІМ (схема 3.2)	-0,22	0,25	2,58
ПІД-регулятор з імпульсним перетворювачем (схема 3.3)	-0,21	0,25	2,56
ПІ-регулятор з генератором імпульсів (схема 3.4)	-1,00	1,02	12,04

Крім дослідження точності імпульсних ПІД-регуляторів, у другому розділі представлено удосконалений алгоритм ШІМ для керування тепловим об'єктом (на основі схеми 4 згідно розробленої класифікації). Коливання оцифрованого вхідного аналогового сигналу внаслідок роботи аналого-цифрового перетворювача та

наявність шумів у аналоговому сигналі приводять до виникнення зайвих високочастотних спрацювань вихідного релейного контакту (брязкіт контакту), що є причиною виходу контакту з ладу. Для усунення цього негативного явища розроблено удосконалений алгоритм ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань, а саме введено ще один компаратор для порівняння вихідного сигналу інтегратора зі зміщеним сигналом завдання шпаруватості. Таким чином усувається брязкіт контакту, а також забезпечується підвищення надійності функціонування контролера та збільшення часового ресурсу роботи його вихідного релейного контакту.

Ще одним завданням при налаштуванні ШІМ для керування тепловим об'єктом є вибір періоду імпульсів. Якщо період імпульсів є занадто великим, то буде спостерігатись коливання регульованого параметру, а якщо занадто малим – то швидко буде зношуватись вихідний релейний контакт контролера. Тому, пропонується вибирати період імпульсів на основі нормованої амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) об'єкта регулювання, а саме встановлювати такий період імпульсів, що відповідає частоті, при якій нормована АЧХ ОР не перевищує 0,1 %.

Також у другому розділі розроблено методику розрахунку оптимального експоненціального фільтра аналогового сигналу на вході автоматичного регулятора. Суть цієї методики полягає у виконанні таких кроків:

Крок 1. Розрахувати усереднений аналоговий сигнал, застосувавши неспричинний фільтр ковзного середнього згідно формули:

$$y^y = \frac{1}{5}(y_{n-2}^e + y_{n-1}^e + y_n^e + y_{n+1}^e + y_{n+2}^e), \quad (4)$$

де y^e – експериментальні точки.

Крок 2. Розрахувати середнє значення квадрату відхилення експериментальних точок від усереднених експериментальних точок згідно формули

$$D = \frac{1}{N-4} \sum_{i=3}^{N-2} (y_i^e - y_{i-2}^y)^2, \quad (5)$$

де N – кількість зареєстрованих експериментальних точок аналогового сигналу; y^y – усереднені експериментальні точки, отримані на кроці 1.

Крок 3. Профільтрувати експериментальний аналоговий сигнал за допомогою експоненціального фільтра зі сталою часу $T_\phi = 1$ с. та отримати сигнал $y^{\phi 1}$.

Крок 4. Розрахувати усереднений профільтрований сигнал, застосувавши неспричинний фільтр ковзного середнього.

Крок 5. Розрахувати середнє значення квадрату відхилення профільтрованих точок, отриманих на кроці 3, від усереднених профільтрованих точок, отриманих на кроці 4. Величина D характеризує розсіювання відфільтрованого сигналу відносно усередненого відфільтрованого сигналу і служить показником якості процесу фільтрування.

Крок 6. Розрахувати максимальну динамічну похибку усереднених профільтрованих точок, отриманих на кроці 4, відносно усереднених експериментальних точок, отриманих на кроці 1:

$$\delta_{\max} = \max(|y^{\phi 1} - y^y| \times 100). \quad (6)$$

Крок 7. Виконати кроки 3...6 послідовно для значень сталої часу експоненціального фільтра $T_\phi = 2, 3, 4 \dots n$ с. Розрахунки виконувати до тих пір, поки максимальна динамічна похибка не перевищить 10%. У результаті виконаних розрахунків буде отримано залежність середнього квадрату відхилення D від сталої часу фільтра T_ϕ , а також залежність максимальної динамічної похибки δ_{\max} від сталої часу фільтра T_ϕ .

Крок 8. Для отриманих масивів значень середнього квадрату відхилення D та максимальної динамічної похибки δ_{\max} розрахувати інтегральний критерій оптимальності згідно формули

$$I(T_\phi) = D'(T_\phi) + \delta'_{\max}(T_\phi), \quad (7)$$

де $D'(T_\phi)$ – приведені значення середнього квадрату відхилення; $\delta'_{\max}(T_\phi)$ – приведені значення максимальної динамічної похибки.

Приведені значення середнього квадрату відхилення розраховують так:

$$D'(T_\phi) = D(T_\phi) / D(0), \quad (8)$$

де $D(0)$ – значення середнього квадрату відхилення для нефільтрованого сигналу.

Приведені значення максимальної динамічної похибки розраховують так:

$$\delta'_{\max}(T_\phi) = \delta_{\max}(T_\phi) / \delta_{\max}(n), \quad (9)$$

де $\delta_{\max}(n)$ – останнє значення максимальної динамічної похибки (для останнього значення сталої часу фільтра $T_\phi = n$ с).

На основі розрахованих значень інтегрального критерію оптимальності визначити оптимальну сталу часу фільтра, тобто таку сталу, для якої критерій приймає мінімальне значення:

$$T_\phi = T_\phi^{opt} \Big|_{I=\min(I)}. \quad (10)$$

Застосування розробленої методики розрахунку оптимального значення сталої часу фільтра в автоматизованих системах вимірювання та керування забезпечить високу якість процесу фільтрування при незначній динамічній похибці профільтрованого сигналу.

У **третьому розділі** виконано дослідження нелінійних об'єктів регулювання та побудовано їх математичні моделі на основі отриманих експериментальних даних, а також проаналізовано ефективність роботи теплогенеруючих об'єктів із врахуванням похибок обліку енергоносіїв.

Перший нелінійний об'єкт регулювання, для якого виконано дослідження – тепловий об'єкт (електрична піч). Такі об'єкти застосовуються у різних виробництвах хімічної, харчової та фармацевтичної промисловості для термічної обробки, нагріву, сушіння, стерилізації та інших технологічних операцій. Для врахування нелінійності та покращення якості автоматичного керування тепловими об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів необхідно мати математичну модель цього об'єкта. З метою розроблення математичної моделі було виконано експериментальне дослідження теплового об'єкта. Установка для дослідження складалася з лабораторної електричної печі, через яку протікало повітря. У піч був встановлений термоперетворювач опору для вимірювання температури, електрична потужність на вході печі змінювалася за допомогою лабораторного

автотрансформатора, осердя якого переміщувалося за допомогою електричного виконавчого механізму із давачем положення.

Вихідною величиною об'єкта є температура (θ), вхідною величиною – положення осердя лабораторного автотрансформатора (μ_W), який змінює електричну потужність на вході печі (цей вхідний сигнал є і регулюючою дією), а збуренням є положення заслінки на лінії подачі повітря у піч (μ_Z). Під час виконання експериментальних досліджень було зареєстровано п'ятнадцять кривих розгону, з яких тринадцять – каналом регулюючої дії (змінюю електричної потужності на вході печі) і дві – каналом збурення витратою повітря через піч.

На основі отриманих експериментальних даних побудовано рівняння статичної характеристики об'єкта регулювання по каналу регулювання у такому вигляді:

$$\theta = 0,5446 \cdot \mu_W + 32,5359. \quad (11)$$

Для каналу збурення рівняння статичної характеристики має вигляд:

$$\theta = -0,2320 \cdot \mu_Z + 68,7000. \quad (12)$$

Максимальна відносна похибка рівняння статичної характеристики для каналу регулювання не перевищує 5% у діапазоні μ_W від 5 до 80 %. Для каналу збурення максимальна відносна похибка не перевищує 0,5 % у діапазоні μ_Z від 50 до 100 %.

На основі порівняння нормованих кривих розгону під час нагрівання та охолодження для каналу регулювання встановлено, що ці криві практично накладаються, тобто динаміка при нагріванні та при охолодженні є однаковою. Для побудови динамічної моделі об'єкта регулювання, який є двоємнісним об'єктом, виконано апроксимацію експериментальної кривої розгону теоретичною із застосування чисельного та графоаналітичного способу. На основі виконаного дослідження встановлено, що чисельний спосіб забезпечує найменшу похибку наближення (5 %), але у цьому способі друга стала часу є близькою до нуля. Тобто чисельний спосіб наближає об'єкт другого порядку ланкою першого порядку і цей спосіб не забезпечить адекватного опису поведінки двоємнісного об'єкта. Графоаналітичний спосіб добре описує поведінку двоємнісного об'єкта, оскільки дві сталі часу є співмірними, і цей спосіб забезпечує точку перегину, що є і на експериментальній кривій, проте похибка його є досить велика (14 %). Тому було запропоновано комбінований спосіб, суть якого полягає в тому, що перша стала часу береться з чисельного способу, а друга – з графоаналітичного. Таким чином отримано значення сталих часу моделі двоємнісного об'єкта із задовільною похибкою, яка становить 7 %.

Динамічна модель об'єкта для каналу регулювання побудована у вигляді такої функції передачі:

$$W_{OP}^x(p) = \frac{k_x}{(a_x p + 1)} \cdot \frac{1}{(b_x p + 1)}, \quad (13)$$

де $k_x=0,5446$ °C/% – коефіцієнт передачі; $a_x=499,55$ с, $b_x=25,22$ с – сталі часу.

Для каналу збурення також виконано порівняння нормованих кривих розгону під час нагрівання та охолодження. На основі порівняння встановлено, що

нормовані криві розгону суттєво відрізняються, тобто динаміка при нагріванні та при охолодженні є різною. Для врахування різної динаміки об'єкта, побудовано його модель у вигляді такої нелінійної системи диференціальних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_z \cdot \frac{dy_{np1}}{dt} + (y_{np1})^n = c \cdot k_z \cdot z; \\ b_z \cdot \frac{dy_z}{dt} + y_z = y_{np1}; \\ a_k \cdot \frac{dy_{np2}}{dt} + y_{np2} = k_k \cdot \frac{dz}{dt}; \\ b_k \cdot \frac{dy_k}{dt} + y_k = y_{np2}; \\ y(t) = y_z(t) - y_k(t - \tau), \end{array} \right. \quad (14)$$

де $k_z = -0,2320$ °C/% – коефіцієнт передачі основної ланки; $a_z = 90,46$ с, $b_z = 10,91$ с – сталі часу основної ланки; $k_k = -37,8464$ °C/% – коефіцієнт передачі коректуючої ланки ланки; $a_k = b_k = 282,66$ с – сталі часу коректуючої ланки; $n = 0,8494$, $c = 0,6913$ – коефіцієнти, що враховують різну динаміку об'єкта при нагріванні та охолодженні.

Максимальна похибка моделі для кривої нагріву становить 9 %, а для кривої охолодження – 6 %. Розроблена модель теплового об'єкта була застосована для дослідження схем імпульсних ПД-регуляторів у складі нелінійної САР.

Другий нелінійний об'єкт регулювання, який було досліджено – кульовий барабанний млин для розмелювання вугілля на тепловій електричній станції (ТЕС). Технологічні процеси подрібнення твердих матеріалів за допомогою кульових барабанних млинів (КБМ) є важливими для багатьох галузей промисловості. Особливе значення вони мають для ТЕС, що працюють на твердому паливі – вугіллі, подрібнення якого здійснюється за допомогою КБМ. Це пов'язано з тим, що такі вугільні млини є крупними споживачами електроенергії, оскільки процеси подрібнення є енергоємними. Так, витрата електричної енергії на приготування вугільного пилу на ТЕС складає близько 25% від загальної витрати електричної енергії на власні потреби, або близько 2% від загального вироблення електричної енергії. В зв'язку з цим виникає завдання зменшити енергомісткість цього технологічного процесу. І це завдання можна вирішити шляхом створення відповідних моделей, які адекватно описують поведінку КБМ і на основі яких будуть розроблені високоефективні системи автоматичного управління такими технологічними процесами.

Математичну модель КБМ розроблено із застосуванням законів збереження маси та тепла, рівнянь витрати та теплообміну. У результаті, отримано модель у вигляді системи диференціальних рівнянь (15). Ця математична модель є

нелінійною і пов'язує температуру аеросуміші на виході млина (T_a), завантаженість млина (L), розмелювальну продуктивність (F_p) та перепад тиску на млині (ΔP) з такими параметрами, як витрата і температура сушильного агента, а також витрата вугілля із врахуванням конструктивних розмірів млина. Для перевірки адекватності моделі було застосовано експериментальні дані перехідного процесу під час роботи КБМ. Порівняння експериментального та змодельованого сигналу температури аеросуміші на виході млина, представлене на рис. 17. Відносна приведена похибка змодельованого сигналу температури аеросуміші на виході млина відносно експериментальних значень становить 5,0 %. Для сигналу завантаженості млина ця похибка становить 7,4 %, а для перепаду тиску на млині – 11,2 %. Оскільки автоматичне керування подачею вугілля у млин здійснюється на основі сигналу температури аеросуміші, то отримана модель достатньо адекватно описує перехідний процес у КБМ. Отримана модель була застосована для розробки алгоритму керування роботою кульового барабанного млина.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_M \frac{d\rho_a}{dt} = F_{c.a} \cdot \rho_{c.a} + F_B^m + 0,4 \cdot F_p^m - F_a \cdot \rho_a; \\ A \cdot \frac{dF_{c.a}}{dt} + F_{c.a}^2 = k^2 \cdot \frac{P_1 - P_2}{\rho_{c.a}}; \\ A \cdot \frac{dF_a}{dt} + F_a^2 = k^2 \cdot \frac{P_2 - P_3}{\rho_a}; \\ F_p^m = (F_a(t - \tau_M) \cdot \rho_a(t - \tau_M) - F_{a.0} \cdot \rho_{a.0}) / 1,4; \\ \Delta P = P_1 - P_2 + \frac{F_a^2(t - \tau_M) \cdot \rho_a^2(t - \tau_M)}{k^2 \cdot \rho_{c.a}}; \\ L = (\rho_a - \rho_{a.0}) \cdot V_M; \\ \frac{dT_a}{dt} \cdot V_M \cdot \rho_a \cdot c_{pa} = T_{c.a} \cdot c_{pc.a} \cdot F_{c.a} \cdot \rho_{c.a} + T_B \cdot c_{pb} \cdot F_B^m + \\ + 0,4 \cdot \frac{T_a + T_e}{2} \cdot c_{pb} \cdot F_p^m - \\ - T_a \cdot c_{pa} \cdot F_a \cdot \rho_a - K_M \cdot S_M \cdot (T_a - T_{нов}), \end{array} \right. \quad (15)$$

де V_M – внутрішній об'єм млина (м^3); ρ_a – густина аеросуміші ($\text{кг}/\text{м}^3$); $F_{c.a}$ – витрата сушильного агента, що подається на вхід КБМ ($\text{м}^3/\text{с}$); $\rho_{c.a}$ – густина сушильного агента ($\text{кг}/\text{м}^3$); F_B^m – витрата сирого вугілля, що поступає в КБМ ($\text{кг}/\text{с}$); F_p^m – розмелювальна продуктивність млина ($\text{кг}/\text{с}$); F_a – витрата аеросуміші, що виходить із КБМ ($\text{м}^3/\text{с}$); P_1 – тиск на вході КБМ (Па); P_2 – тиск всередині КБМ, Па; P_3 – тиск на виході КБМ (Па); τ_M – транспортне запізнення руху вугілля через млин (с); A, k – коефіцієнти, що враховують конструктивні характеристики КБМ; c_{pa} – теплоємність аеросуміші ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); $c_{pc.a}$ – теплоємність сушильного агента ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); c_{pb} – теплоємність сирого вугілля ($\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$); T_e – температура сирого вугілля, що поступає в КБМ (К); $T_{c.a}$ – температура сушильного агента (К); T_a – температура аеросуміші на виході КБМ (К); $T_{нов}$ – температура навколишнього повітря (К).

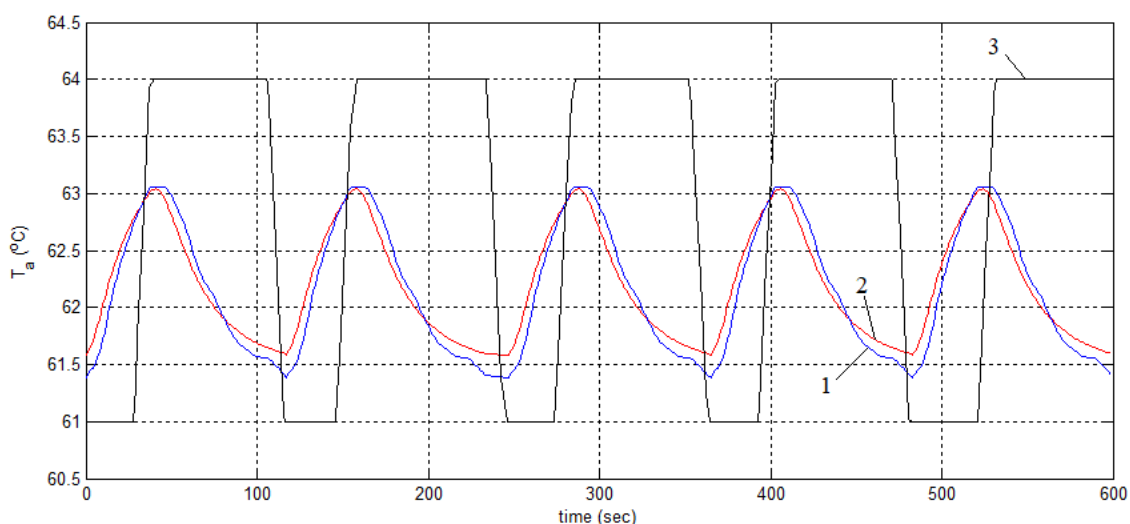


Рис.17. Порівняння експериментального (1) та змодельованого (2) сигналу температури аеросуміші на виході млина при зміні подачі вугілля у млин (3).

Також у третьому розділі досліджено теплогенеруючі об'єкти з точки зору ефективності їх роботи. Теплогенеруючі об'єкти (котельні, ТЕЦ, ТЕС) є стратегічно важливими частинами у всіх галузях промисловості, в комунальній сфері та побуті для забезпечення гарячого водопостачання, опалювання приміщень та подачі теплової енергії на технологічні потреби. Енергоефективність теплогенеруючих об'єктів визначається кількістю вхідного палива, що витрачається на виробництво одиниці теплової енергії вихідного теплоносія. Для визначення енергоефективності теплогенеруючого обладнання (наприклад, водогрійного котла) складають рівняння його теплового балансу. Один із головних складових цього рівняння є витрата палива на вході. Для газового котла – це витрата природного газу, що подається на пальник для спалювання. Від точності вимірювання витрати природного газу залежить точність визначення енергоефективності. Тому, усунення похибок вимірювання витрати природного газу є актуальним завданням, яке потребує вирішення.

Особливістю обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах є наявність значних різниць температур потоку газу та навколишнього повітря. В таких умовах похибка вимірювання температури потоку газу може приймати особливо великі значення і вплив температурних умов роботи систем обліку на точність вимірювання витрати та кількості природного газу може бути суттєвим.

Виконано дослідження похибок вимірювання температури потоку природного газу, зумовлених: інерційністю термоперетворювача в імпульсних режимах протікання газу (ΔT_{in}); теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу (ΔT_T); теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям (ΔT_x); теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу ($\Delta T_{лг}$).

На основі закону збереження тепла, рівнянь теплообміну та рівняння витрати газу розроблено математичну модель похибки ΔT_{in} у вигляді системи рівнянь (16). Ця математична модель була застосована для моделювання похибки ΔT_{in} для умов

установки, на якій було виконано експериментальне дослідження перехідних процесів у системі обліку на базі роторного лічильника. У результаті порівняння змодельованих значень похибки ΔT_{in} та експериментальних було встановлено, що відносне відхилення змодельованих значень похибки ΔT_{in} від експериментальних не перевищує 8%.

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{газ} \cdot c_{p,газ} \frac{dT_{газ2}}{dt} = T_{газ1} \cdot c_{p,газ} \cdot F_{газ} \cdot \rho_{газ} - \\ - T_{газ2} \cdot c_{p,газ} \cdot F_{газ} \cdot \rho_{газ} - \\ - K_L \cdot L \cdot (T_{газ2} - T_{нов}); \\ A \frac{dF_{газ}}{dt} + F_{газ}^2 = k^2 \cdot \frac{P_{газ1} - P_{газ2}}{\rho_{газ}}; \\ F_{c,газ} = F_{газ} \frac{\rho_{газ}}{\rho_{c,газ}}; \\ \rho_{газ} = \rho_{c,газ} \frac{P_{газ2} \cdot T_c}{P_c \cdot T_{газ2} \cdot K_{газ}}; \\ T_{TT} \frac{dT_{в,газ}}{dt} + T_{в,газ} = T_{газ2}; \\ \Delta T_{in} = T_{в,газ} - T_{газ2}, \end{array} \right. \quad (16)$$

де $m_{газ}$ – маса газу, що знаходиться в трубопроводі; $c_{p,газ}$ – питома теплоємність газу; $T_{газ2}$ – температура газу на вимірювальній ділянці трубопроводу; K_L – лінійний коефіцієнт теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря; L – довжина трубопроводу; $T_{нов}$ – температура навколишнього повітря; A, k – коефіцієнти, що враховують конструктивні розміри трубопроводу; $\rho_{газ}$ – густина газу за робочих умов; $P_{газ1}$ – тиск газу на вході трубопроводу; $P_{газ2}$ – тиск газу на виході трубопроводу; $F_{газ}$ – об’ємна витрата газу за робочих умов; $F_{c,газ}$ – витрата газу, зведена до стандартних умов; $\rho_{c,газ}$ – густина газу за стандартних умов; $P_{c,газ}$ – тиск газу за стандартних умов; $T_{c,газ}$ – температура газу за стандартних умов; $K_{газ}$ – коефіцієнт стисливості природного газу; T_{TT} – стала часу вимірювального перетворювача температури; $T_{в,газ}$ – вимірне значення температури газу.

На основі експериментальних досліджень теплообміну між потоком газу та корпусом роторного лічильника газу було розроблено математичну модель похибки $\Delta T_{ЛГ}$ у вигляді такої залежності:

$$\Delta T_{ЛГ} = (T_{нов} - T_{газ2}) \cdot \left(e^{\frac{D \cdot (86,9696 \cdot K_l^3 - 20,7417 \cdot K_l^2 + 16,7893 \cdot K_l)}{F_{m,газ} \cdot c_{p,газ}}} - 1 \right), \quad (17)$$

де $T_{газ2}$ – температура газу на виході лічильника, К; K_l – лінійний коефіцієнт теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря, Вт/(м²·К).

Розроблені математичні моделі похибок $\Delta T_{ДГ}$ та ΔT_{in} дають можливість визначати вплив теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника газу, а також вплив інерційності термоперетворювача в імпульсних режимах протікання природного газу на точність його обліку в умовах теплогенеруючих об'єктів.

У четвертому розділі виконано розрахунок параметрів налаштування ПІД-регулятора для керування тепловим об'єктом за допомогою імпульсного регулятора, а також розроблено алгоритм управління кульовим барабанним млином для оптимізації його завантаженості.

На основі розробленої математичної моделі теплового об'єкта (електрична піч) було виконано розрахунок параметрів налаштування ПІД-регулятора із застосуванням методу CHR (Chien, Hrones, Reswick) та методу розширених частотних характеристик (РЧХ). Результати розрахунку параметрів автоматичного регулятора та показників якості перехідних процесів у режимі ПІ-закону регулювання представлені у табл. 2. Порівняння результатів розрахунку параметрів автоматичного регулятора у режимі ПІ- та ПІД-закону регулювання на основі методу РЧХ представлено у табл. 3.

Таблиця 2

Параметри автоматичного регулятора та якісні показники перехідних процесів у САР

Метод визнач. парам. АР	$K_{П}, \%/^{\circ}\text{C}$	$T_{ІЗ}, \text{с}$	$A_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_p, \text{с}$	ψ	$\varphi, \%$	$\Delta_{ст}, ^{\circ}\text{C}$
Збурення зміною завдання регулятора (вихід на номінальний режим)							
CHR	46,18	55,73	22,05	424	0,81	41	0
РЧХ	30,03	201,98	8,41	398	0,89	0	0
Збурення каналом збурення (витрата повітря через піч)							
CHR	46,18	55,73	1,46	145	0,93	53	0
РЧХ	30,03	201,98	1,78	123	1	0	0

Таблиця 3

Параметри ПІ- та ПІД-регулятора та відповідні якісні показники перехідних процесів у САР

Закон регулюв.	$K_{П}, \%/^{\circ}\text{C}$	$T_{ІЗ}, \text{с}$	$T_D, \text{с}$	$A_1, ^{\circ}\text{C}$	$t_p, \text{с}$	ψ	$\varphi, \%$
Збурення зміною завдання регулятора (вихід на номінальний режим)							
ПІ	4,16	71,63	-	3,0	209	1	43
ПІД	9,89	79,04	5,02	5,9	123	0,97	10
Збурення каналом збурення							
ПІ	4,16	71,63	-	5,5	105	0,95	0
ПІД	9,89	79,04	5,02	3,5	69	0,94	0

З табл.2 видно, що параметри налаштування автоматичного регулятора, отримані методом РЧХ, забезпечують кращу якість перехідних процесів, оскільки час регулювання (t_p) є меншим, ступінь заникання (ψ) є більшим, а перерегулювання відсутнє ($\phi=0$). З табл. 3 видно, що ПД-закон регулювання забезпечує кращу якість перехідних процесів, ніж ПІ-закон, оскільки максимальне динамічне відхилення (A_1) та час регулювання є меншими для збурення каналом збурення. Отримані значення параметрів налаштування ПД-регулятора застосовано для дослідження перехідних процесів у системі автоматичного регулювання з нелінійним об'єктом на базі різних схем імпульсного ПД-регулятора.

Також у четвертому розділі розроблено алгоритм управління кульовим барабанним млином для оптимізації його завантаженості. Кульовий барабанний млин є складним об'єктом і при керуванні його роботою необхідно дотримуватись певних режимів для забезпечення надійного та ефективного розмелювання вугілля. Небезпечним явищем під час роботи КБМ є виникнення аварійних ситуацій, а саме: завал млина, вибух аеросуміші, блокування та вихід з ладу пилепроводів.

Під час налагодження системи автоматичного керування роботою КБМ, млин попередньо калібрують, тобто знімають статичну характеристику залежності завантаженості млина (L) від продуктивності живильника сирого вугілля (ЖСВ) на вході ($F_{вг}$). Завантаженість млина є також мірою його розмелювальної продуктивності (F_p). Зі статичної характеристики КБМ видно, що при збільшенні продуктивності ЖСВ кількість матеріалу в млині зростає. Коли кількість вугілля в млині досягає максимально можливого значення, при подальшому збільшенні продуктивності ЖСВ відбувається зменшення розмелювальної продуктивності млина, що приводить до завалу млина. Залежно від якісних характеристик сирого вугілля (вологість, гранулометричний склад) завал може відбутись при різних значеннях продуктивності ЖСВ. Для запобігання цього явища розмелювальну продуктивність КБМ підтримують на рівні 40-50%, що приводить до неефективного використання млина за рахунок суттєвих затрат електроенергії на процес розмелювання, а також до зношування кульового заряду та внутрішньої броні КБМ.

Сьогодні існують такі алгоритми керування роботою КБМ: керування за вимірним сигналом вібрації опори переднього підшипника млина; керування за вимірним сигналом перепаду тиску на млині; керування за вимірним сигналом температури аеросуміші на виході млина; керування за вимірним сигналом споживаної активної потужності приводу КБМ. Недоліками цих алгоритмів є те, що вони не забезпечують максимально можливу розмелювальну продуктивність млина при зміні характеристик сирого вугілля.

Для забезпечення максимально можливої розмелювальної продуктивності КБМ при зміні характеристик сирого вугілля розроблено удосконалений алгоритм автоматичного керування, відповідно до якого подача сирого вугілля у млин

здійснюється за виміряним значенням температури аеросуміші на виході млина. Завдання локальному регулятору поступає з верхнього рівня керування із врахуванням зміни завантаженості млина при подачі вугілля. Система керування перебуває у постійному пошуку максимального значення розмелювальної продуктивності на основі виміряного значення завантаженості млина (L). В алгоритмі передбачено захист за такими технологічними параметрами: вібрація опори переднього підшипника ($v_{вх}$), перепад тиску на млині (ΔP), температура аеросуміші на виході млина ($T_{а.с}$). Крім цього передбачено вимірювання ще одного параметра – вібрація опори заднього підшипника ($v_{вих}$). Цей сигнал корелюється із кількістю вугілля у задній частині барабана млина і він забезпечує додатковий захист від завалу млина для підвищення надійності роботи КБМ у автоматичному режимі.

Розроблений алгоритм автоматичного керування кульовим барабанним млином був впроваджений на Бурштинській тепловій електростанції, що забезпечило економію електроенергії, яка витрачається для розмелювання вугілля, на 15% та підвищило маневреність парових котлів.

П'ятий розділ присвячений моделюванню перехідних процесів у системі автоматичного регулювання з нелінійним тепловим об'єктом на основі різних схем імпульсного регулятора. Також досліджено перехідні процеси у системі автоматичного керування завантаженою кульового барабанного млина. Крім цього змодельовано похибки автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах та розроблено заходи для підвищення точності цих систем обліку.

Моделювання перехідних процесів у замкнутій САР виконано на основі розробленої моделі об'єкта регулювання (електрична піч) та отриманих параметрів налаштування автоматичного регулятора. Перехідні процеси отримано для двох типів збурення: стрибкоподібна зміна завдання регулятора та стрибкоподібна зміна витрати повітря, що поступає у піч.

Для кількісної оцінки відхилення перехідного процесу у САР з імпульсним регулятором від перехідного процесу у САР з аналоговим регулятором розраховано середньоквадратичне відхилення згідно формули:

$$\sigma_{CAP} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (X_{имн} - X_{ан})^2 dt, \quad (18)$$

де t_1 і t_2 – відповідно, час початку та час завершення моделювання перехідного процесу, $X_{имн}$ – вихідний сигнал ОР (θ) для САР на базі імпульсного регулятора, $X_{ан}$ – вихідний сигнал ОР (θ) для САР на базі аналогового регулятора.

Структурна схема САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням в середовищі SIMULINK представлена на рис.16. Порівняння перехідних процесів для цієї схеми наведено на рис.17 та 18. Аналогічні перехідні процеси були отримані для інших схем імпульсних ПІД-регуляторів. Показники

якості перехідних процесів (час регулювання та середньоквадратичне відхилення) у САР з різними схемами імпульсних регуляторів представлені у табл. 4.

З отриманих результатів видно, що найкращу якість перехідних процесів забезпечує схема ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем, оскільки у системі автоматичного регулювання на базі цього регулятора час регулювання та середньоквадратичне відхилення для збурення витратою повітря є найменшими.

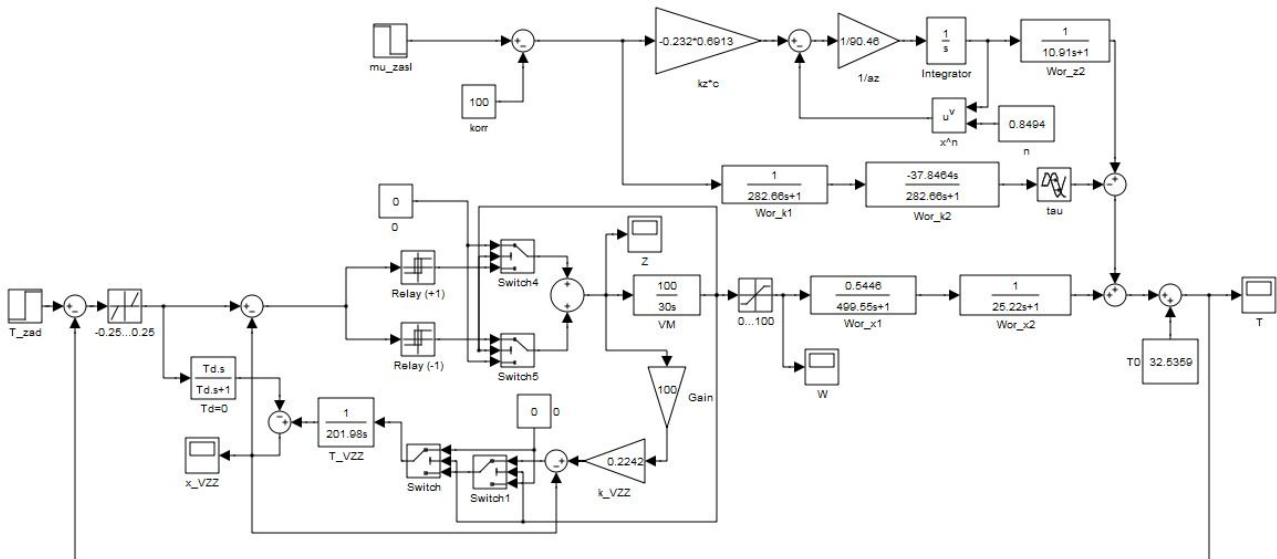


Рис.16. Структурна схема САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням в середовищі SIMULINK.

Таблиця 4

Якісні показники якості перехідних процесів у САР

Назва схеми	ПІ-закон регулювання				ПІД-закон регулювання			
	Зміна завдання регулятора		Збурення витратою повітря		Зміна завдання регулятора		Збурення витратою повітря	
	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c
Імп. ПІД-регулятор з подвійним диференц. (схема 3.1)	0,2512	934	0,0309	146	7,6133	149	0,0598	157
ПІД-регулятор з диференціатором та ШІМ (схема 3.2)	0,2654	967	0,0301	146	6,4802	320	0,0480	145
ПІД-регулятор з імп. перетворювачем (схема 3.3)	0,2537	972	0,0184	142	6,4819	319	0,0365	143
ПІ-регулятор з генератором імпульсів (схема 3.4)	0,2628	973	0,0256	147	13,1134	375	0,0792	156

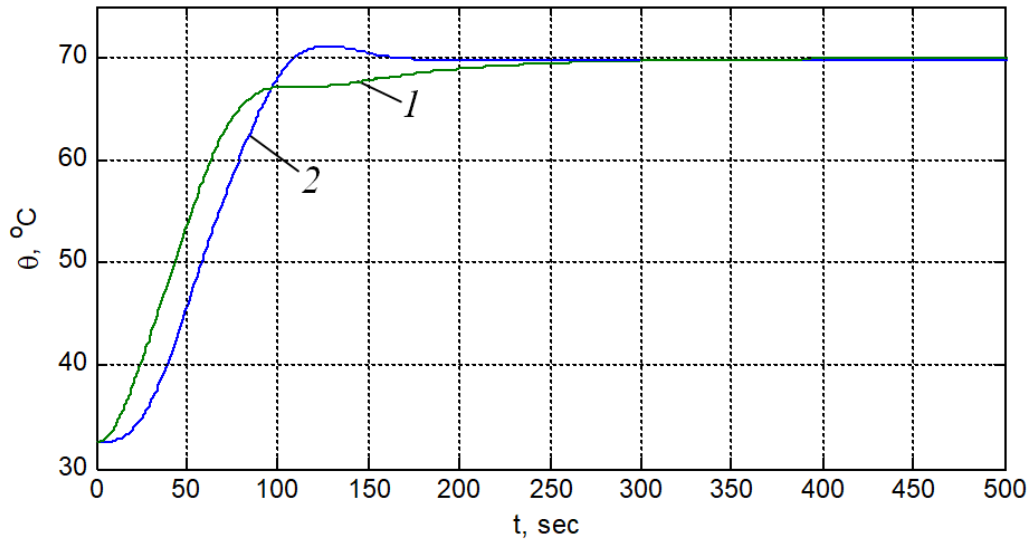
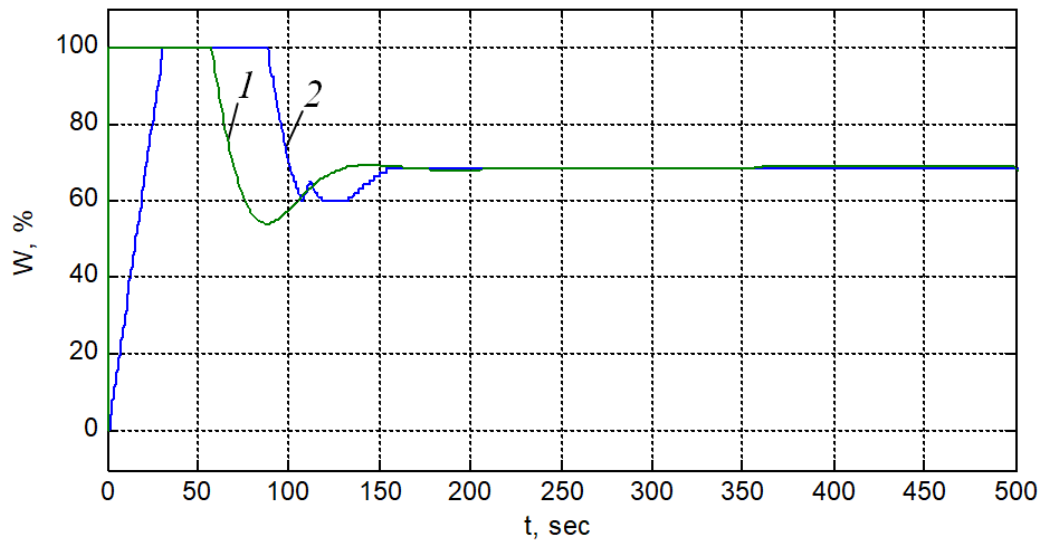
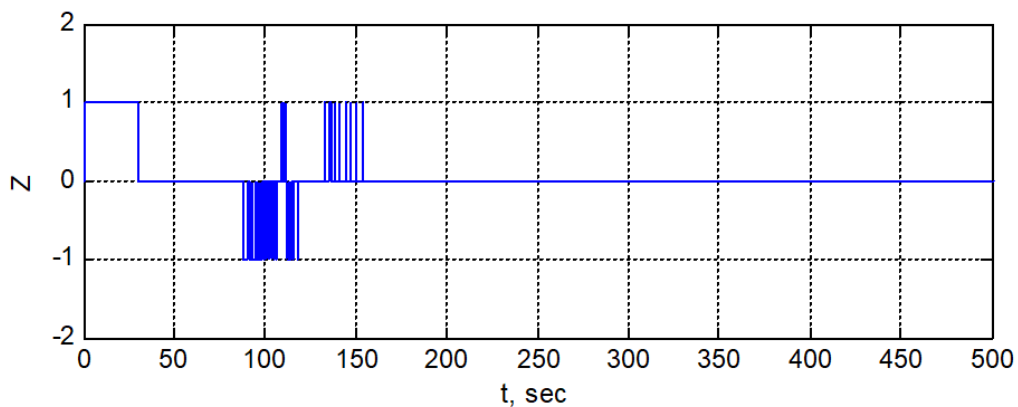
a*б**в*

Рис.17. Порівняння перехідних процесів при збуренні завданням регулятора для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням (2):

a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

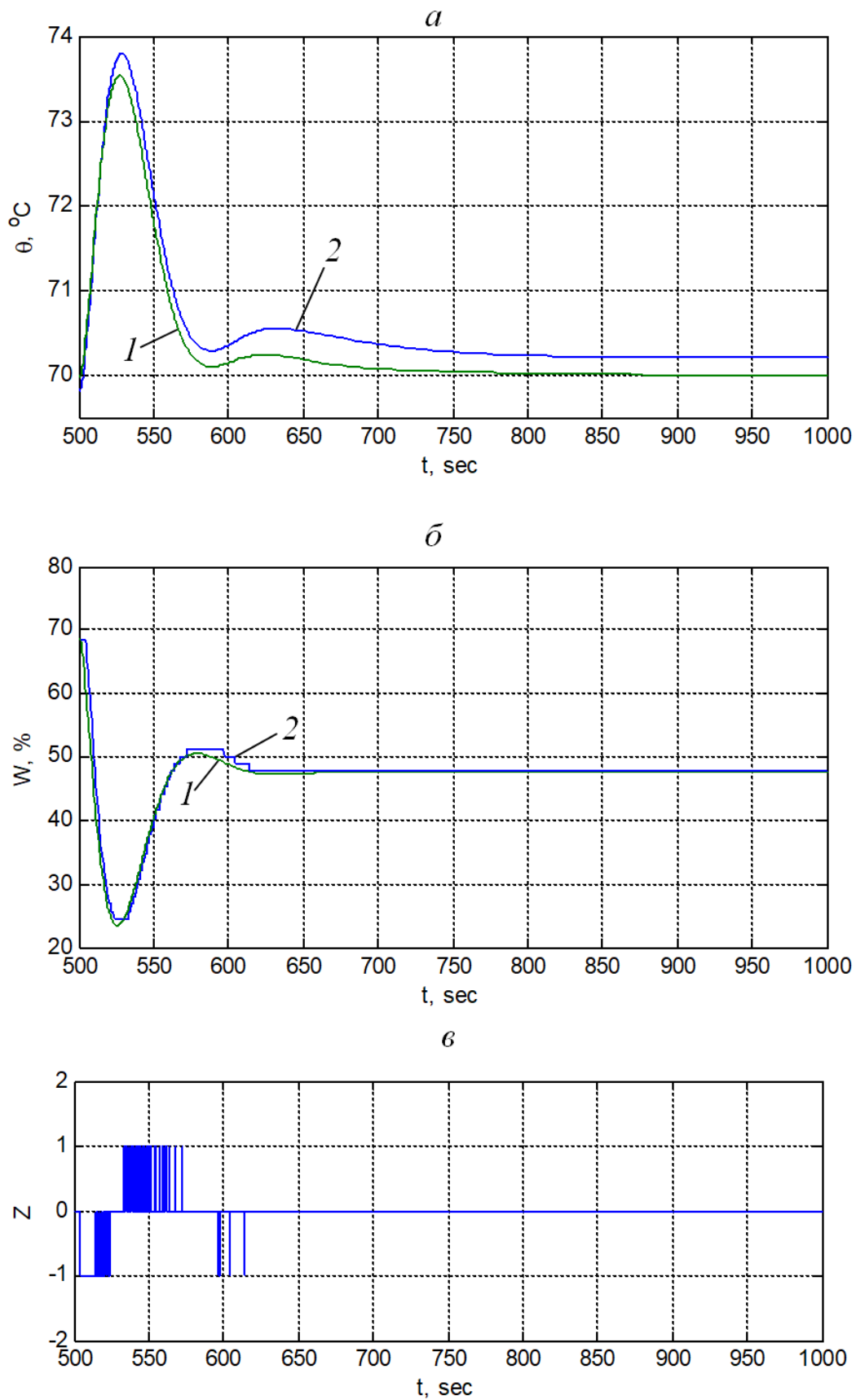


Рис.18. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

Виконано моделювання перехідних процесів у системі автоматичного регулювання завантаженості кульового барабанного млина із застосуванням його математичної моделі. Перехідні процеси отримано для збудження зміною завдання регулятора на $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ у двох режимах подачі сирого вугілля у млин: неперервна подача та імпульсна. На основі моделювання встановлено, що при імпульсній подачі сирого вугілля розмелювальна продуктивність млина є вищою, ніж при неперервній подачі. Крім цього, імпульсна подача забезпечує рівномірний розподіл вугілля вздовж барабана млина, завдяки чому зношування куль та внутрішньої броні млина є рівномірним по всій довжині барабана. Таким чином збільшується ресурс роботи кульового заряду та внутрішньої броні КБМ.

Основним режимом роботи автоматичного регулятора завантаженості КБМ є такий, при якому регулятор знаходить і забезпечує подачу в млин такої кількості сирого вугілля, при якій досягається максимально можлива розмелювальна продуктивність млина. Максимально можлива продуктивність млина в залежності від характеристик вугілля і пилесистеми має місце при різних ступенях завантаженості млина вугіллям, як правило на рівні 80-97% максимально можливої завантаженості.

У п'ятому розділі також виконано моделювання похибок автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах. Для моделювання похибки, зумовленої інерційністю термоперетворювача в імпульсних режимах протікання газу ΔT_{in} , застосовано математичну модель цієї похибки (16). Моделювання виконано для вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника КВР-1-G250, який встановлений у приміщенні котельні і на ньому має місце імпульсний режим протікання газу, що спричинене режимом споживання газу водогрійним котлом. З результатів моделювання (рис.19) видно, що при імпульсному режимі роботи вузла обліку в умовах, коли температура потоку газу є нижчою за температуру навколишнього повітря ($T_{газ} < T_{нов}$), похибка ΔT_{in} під час увімкнення подачі газу є додатною, а похибки витрати та об'єму (ΔF_c та ΔV_c) – від'ємними. Це означає, що на вузлі обліку має місце заниження вимірюваного об'єму спожитого природного газу, яке може досягати 6 м^3 на добу.

Усунути похибку ΔT_{in} можна шляхом встановлення вузлів обліку на ділянках, де коливання температури та витрати газу є відсутні. Зменшити цю похибку можна шляхом встановлення у вузлі обліку низькоінерційного термоперетворювача без захисної гільзи безпосередньо у потік газу.

Виконано моделювання похибки вимірювання температури газу, зумовленої теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу $\Delta T_{лг}$, із застосуванням розробленої моделі (17) для діючого вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника GMS-G160, при різних значеннях витрати газу та різних температурних напорах (різницях температури потоку газу і навколишнього повітря). На основі результатів моделювання встановлено, що максимальне значення похибки $\Delta T_{лг}$ може сягати $4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При збільшенні витрати газу похибка $\Delta T_{лг}$ зменшується, що пояснюється зменшенням тривалості контакту потоку газу із

корпусом лічильника. При збільшенні різниці температури газу та навколишнього повітря абсолютна величина похибки $\Delta T_{\text{лг}}$ зростає, що пояснюється вищою інтенсивністю теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника при збільшеному температурному напорі.

Зменшити похибку $\Delta T_{\text{лг}}$ можна шляхом встановлення вузла обліку в умовах, де різниця температур потоку газу та навколишнього повітря є мінімальною (наприклад, в шафі на вулиці), а також встановивши теплоізоляцію на ділянці трубопроводу між лічильником газу та термоперетворювачем із запасом по $5D$ з кожного боку.

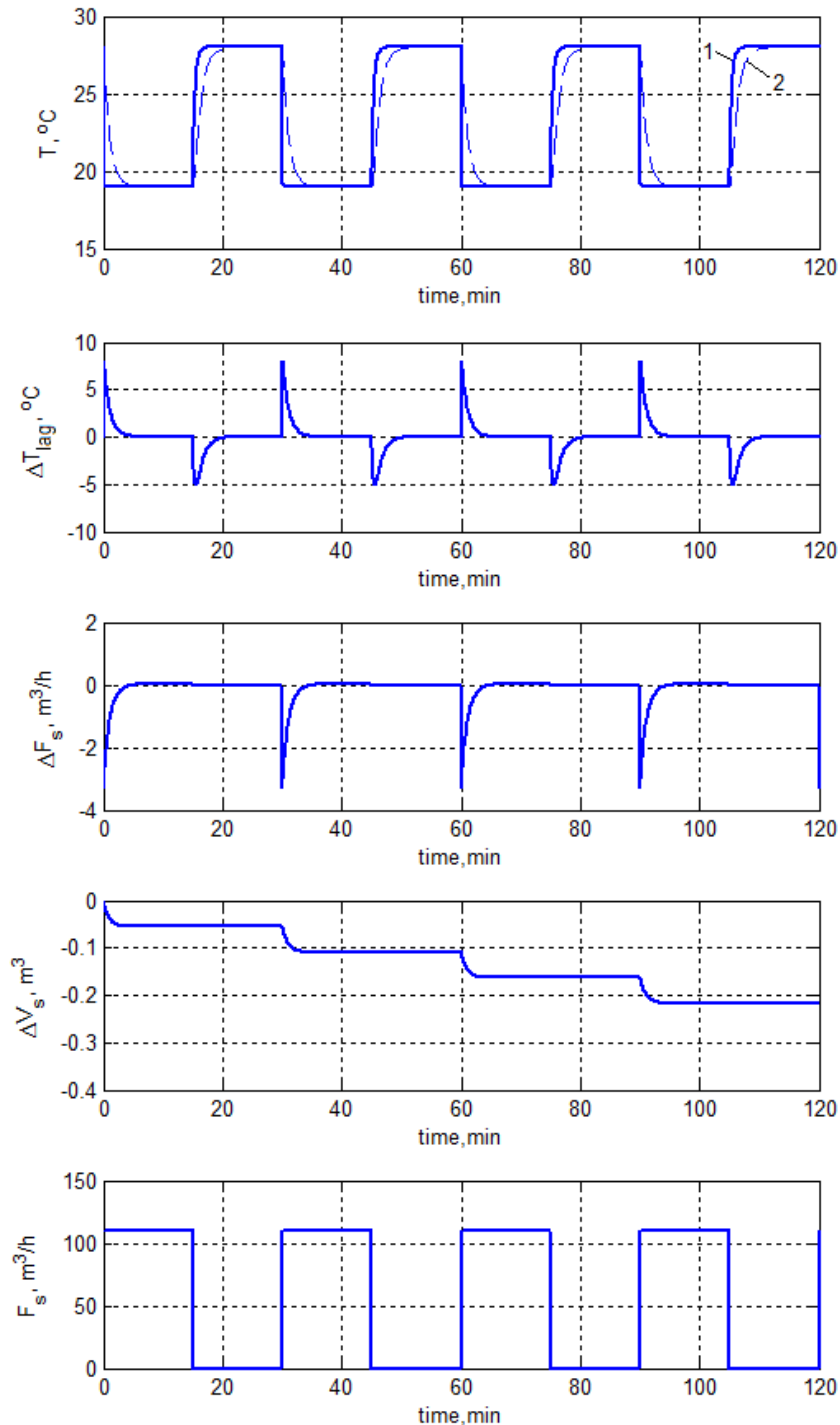


Рис.19. Зміна витрати газу та похибок $\Delta T_{\text{лг}}$, ΔF_c та ΔV_c .

Застосування розроблених моделей похибок ΔT_{in} та $\Delta T_{лг}$ дає можливість оцінити вплив імпульсних режимів протікання газу, а також вплив теплообміну між потоком природного газу та корпусом лічильника на точність вимірювання витрати та об'єму природного газу. Виявлення та усунення додаткових похибок, є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень вирішена важлива науково-технічна проблема – керування нелінійними об'єктами за допомогою імпульсних регуляторів з метою підвищення ефективності та надійності роботи як технологічного обладнання, так і пристроїв систем автоматизації в галузі теплової енергетики, зокрема для теплових об'єктів, для теплогенеруючого обладнання, а також для процесу розмелювання вугілля за допомогою кульових барабанних млинів на теплових електростанціях, і одержано такі основні результати:

1. Проаналізовано основні схеми імпульсних регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії, зокрема схему імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням, схему ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором, схему ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем, а також схему ПІ-регулятора з генератором імпульсів. Виконаний аналіз дає можливість визначати основні структурні елементи, параметри налаштування та властивості схем імпульсних регуляторів для забезпечення можливості прийняття рішення щодо застосування конкретних схем регуляторів для певних об'єктів регулювання.

2. На основі аналізу існуючих класифікацій автоматичних регуляторів встановлено, що сьогодні відомі класифікації регуляторів за рядом ознак (за призначенням, принципом дії, конструктивними особливостями, видом енергії, що використовується, характером зміни регулюючої дії тощо), проте мало уваги приділено впорядкуванню та класифікації схем, які реалізовані в автоматичних регуляторах. Для кращого розуміння відмінності між позиційними, аналоговими та імпульсними регуляторами та їх місця серед інших регуляторів запропоновано нову класифікацію схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання. Особливістю розробленої класифікації є ієрархічне розташування ознак класифікації. Розглянуто усі можливі комбінації типів керуючого впливу на об'єкт регулювання, вихідного сигналу регулятора та закону регулювання. Розроблена класифікація дає можливість спростити завдання вибору та аналізу схем автоматичних регуляторів для керування технологічними об'єктами, оскільки забезпечує наглядну демонстрацію усіх можливих способів впливу автоматичного регулятора на об'єкт регулювання з врахуванням закону регулювання, типу вихідного сигналу регулятора та типу керуючого впливу на об'єкт регулювання. На основі розробленої класифікації синтезовано нові схеми елементів контура регулювання.

3. Запропоновано показники точності для кількісної оцінки якості роботи імпульсного регулятора з виконавчим механізмом, а саме: середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом відносно перехідної характеристики ідеального аналогового регулятора. На основі виконаного моделювання та розрахунків встановлено, що найкращу якість перехідних процесів забезпечує схема з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем (схема 3.3 згідно розробленої класифікації).

4. Виконано аналіз алгоритмів широтно-імпульсної модуляції, зокрема ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань та ШІМ на базі інтегруючої ланки та релейного елемента. Представлено математичні залежності для визначення параметрів налаштувань цих алгоритмів. Наведено приклад застосування ШІМ у складі автоматичного регулятора для керування тепловим об'єктом. Здійснено порівняння якості перехідних процесів у САР на базі двопозиційного регулятора та на базі ПД регулятора з ШІМ. Оскільки в САР із ПД регулятором та ШІМ може виникати високочастотне зайве спрацювання вихідного релейного контакту (брязкіт контакту), то для усунення цього небажаного явища запропоновано удосконалений алгоритм ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань. Суть удосконаленого алгоритму полягає у введенні додаткового компаратора для порівняння вихідного сигналу інтегратора зі зміщеним сигналом завдання шпаруватості.

5. Запропоновано спосіб вибору періоду імпульсів для ШІМ з врахуванням динамічних властивостей об'єкта регулювання. Це дає можливість встановити таке значення періоду імпульсів, при якому коливання регульованого параметра в стані рівноваги будуть відсутні. Застосування удосконаленого алгоритму ШІМ та запропонованого способу вибору періоду імпульсів для ШІМ забезпечує підвищення надійності функціонування контролера та збільшення часового ресурсу роботи його вихідного релейного контакту.

6. Розроблено методику розрахунку оптимального значення сталої часу експоненціального фільтра на основі інтегрального критерію оптимальності, який враховує показник якості процесу фільтрування та динамічну похибку профільтованого сигналу. За показник якості прийнято середнє значення квадрату відхилення профільтованих точок від усереднених профільтованих точок. При цьому усереднення виконано із застосуванням непричинного фільтра ковзного середнього. На прикладі експериментальної кривої розгону для теплового об'єкта виконано розрахунок оптимального значення сталої часу експоненціального фільтра, яке становить 2 с. Для такого значення сталої часу вплив завад (шумів) на корисний сигнал після фільтрування зменшується майже в 20 разів, а максимальна динамічна похибка профільтованого сигналу становить 1,33 %. Застосування розробленої методики розрахунку оптимального значення сталої часу фільтра в автоматизованих системах вимірювання та керування забезпечить високу якість процесу фільтрування при незначній динамічній похибці профільтованого сигналу.

7. Виконано експериментальне дослідження теплового об'єкта (електрична піч), а саме зареєстровано перехідні процеси каналом регулювання та каналом збурення. На основі отриманих експериментальних даних побудовано математичну модель об'єкта регулювання, яка враховує нелінійну поведінку об'єкта, зокрема різну динаміку при нагріванні та при охолодженні. Адекватність моделі підтверджено шляхом порівняння теоретичних кривих розгону з експериментальними. Розроблена модель була реалізована у програмованому логічному контролері для імітації об'єкта регулювання у складі САР.

8. Запропоновано комбінований спосіб визначення сталих часу для математичної моделі теплового об'єкта (електрична піч), відповідно до якого перша стала часу визначається згідно чисельного способу наближення, для якого похибка є найменшою, а друга стала часу – згідно графоаналітичного. Таким чином забезпечується адекватний опис поведінки двоємнісного об'єкта із задовільною точністю.

9. Виконано розрахунок параметрів налаштування автоматичного регулятора для керування тепловим об'єктом із застосуванням інженерного методу та методу розширених частотних характеристик. Проаналізовано якісні показники перехідних процесів, а саме час регулювання та максимальне динамічне відхилення. На основі виконаних розрахунків та моделювання встановлено, що найкращі результати забезпечує ПІ-регулятор з параметрами, отриманими методом розширених частотних характеристик. Ці числові значення параметрів налаштування застосовані для дослідження перехідних процесів у замкнутій САР на базі різних схем імпульсних регуляторів.

10. Проаналізовано кульовий барабанний млин як об'єкт керування. Встановлено, що існує чітка залежність між енергією, яку витрачають кулі у млині на збудження вібрації корпусу КБМ, і кількістю матеріалу, що знаходиться в його барабані. Це означає, що за енергією вібрації корпусу млина чи його підшипників можна робити висновки про кількість матеріалу в його барабані. Виконано дослідження спектральних характеристик віброшвидкості і віброприскорення переднього та заднього підшипника КБМ. Встановлено, що середньоквадратичний рівень віброприскорення вертикальної складової підшипника КБМ характеризує його відносну завантаженість. При максимально-можливій завантаженості млина цей рівень досягає мінімального значення, і при подальшому збільшенні подачі матеріалу в млин – не змінюється.

11. На основі законів збереження маси та тепла, а також рівнянь витрати та теплообміну побудовано математичну модель КБМ у вигляді системи нелінійних диференціальних рівнянь. За результатами порівняння змодельованих перехідних процесів та експериментальних даних визначено, що розроблена модель достатньо адекватно описує перехідні процеси у КБМ.

12. Виконано аналіз алгоритмів керування роботою кульового барабанного млина для розмелювання вугілля. На основі аналізу встановлено, що недоліками існуючих алгоритмів є те, що вони не забезпечують максимально можливу

розмельювальну продуктивність млина при зміні характеристик сирого вугілля. Запропоновано удосконалений алгоритм автоматичного керування роботою КБМ, відповідно до якого подача сирого вугілля у млин здійснюється на основі сигналу температури аеросуміші на виході КБМ. В алгоритмі передбачено захист за такими параметрами, як вібрація опори переднього підшипника, перепад тиску на млині та температура аеросуміші на виході млина. Крім цього передбачено вимірювання ще одного параметра – вібрація опори заднього підшипника. Цей сигнал корелюється із кількістю вугілля у задній частині барабана млина і він забезпечує додатковий захист від завалу млина для підвищення надійності роботи КБМ у автоматичному режимі. Розроблений алгоритм автоматичного керування кульовим барабанним млином був впроваджений на Бурштинській тепловій електростанції, що забезпечило економію електроенергії, яка витрачається для розмельювання вугілля, на 15% та підвищило маневреність парових котлів.

13. Досліджено вплив інерційності термоперетворювача на точність обліку газу в імпульсних режимах роботи системи вимірювання. На основі моделювання встановлено, що в умовах, коли температура потоку газу є нижчою за температуру навколишнього повітря в котельні, похибка вимірювання об'єму газу, внаслідок інерційності термоперетворювача, є від'ємною. Величина похибки залежить від показника теплової інерції термоперетворювача (сталого часу), витрати газу, різниці температур потоку газу та навколишнього повітря та періоду (частоти) імпульсів витрати газу. Для аналізованого вузла обліку природного газу інерційність термоперетворювача при імпульсних режимах потоку може приводити до недообліку 6 м^3 газу за добу, що становить 180 м^3 за місяць.

14. Виконано експериментальні дослідження похибок вимірювання температури потоку газу в системах його обліку, зумовлених: теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу; теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям; теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу. На основі порівняння отриманих експериментальних значень похибок із розрахунковими значеннями, встановлено, що розроблені моделі дають достатньо точні результати розрахунку і можуть бути застосовані для визначення додаткових систематичних похибок вимірювання температури потоку газу, зумовлених теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу і теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям.

15. На основі експериментальних досліджень розроблено математичну модель похибки, зумовленої теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу, в основі якої лежить кореляційна залежність між лінійним коефіцієнтом теплопередачі (від потоку газу до навколишнього повітря) та еквівалентною довжиною прямолінійної ділянки трубопроводу. Розроблена модель похибки дає можливість визначати вплив теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника на точність вимірювання об'єму природного газу для вузлів обліку на базі роторного лічильника, де термоперетворювач встановлено після лічильника.

СПИСОК ОСНОВНИХ НАУКОВИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Колективна монографія:

1. Pistun Ye. P., Zahray V. S., Nykolyn H. A. and Fedoryshyn R. M. Optimization of ball mill performance for coal grinding // Wybrane zagadnienia gospodarki remontowej energetyki, Pod red. S. Zatora i M. Tomaszewskiego (Politechnika Opolska), 2012, ISBN "Nowa Energia" 978-83-928582-8-7, 2012, ss. 145-153.

Статті у наукових виданнях, включених у бази даних Scopus та Web of Science:

2. Fedoryshyn, R.; Zagraj, V. & Pistun, Y. (2011). Automation and optimization of coal grinding by means of ball mills (2011). 0421-0422, Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, ISBN 978-3-901509-83-4, ISSN 1726-9679, pp. 421, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2011.
3. Fedoryshyn, R.; Nykolyn, H.; Zagraj, V. & Pistun, Y. (2012). The improved system for automation and optimization of solid material grinding by means of ball mills. Annals of DAAAM for 2012 & Proceedings of the 23rd International DAAAM Symposium, ISBN 978-3-901509-91-9, ISSN 2304-1382, CDROM version, pp.053-056, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2012.
4. Pistun, Y[evhen]; Fedoryshyn, R[oman]; Zagraj, V[olodymyr]; Nykolyn, H[ryhoriy] & Kokoshko, R[oman] (2019). Experimental Study and Mathematical Modelling of Nonlinear Control Plant, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium, pp.0967-0975, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-22-8, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/30th.daaam.proceedings.134
5. Klos, S[viatoslav]; Fedoryshyn, R[oman]; Savytskyi, V[olodymyr]; Pistun, Y[evhen] & Matiko, F[edir] (2017). Classification of Automatic Controllers Diagrams, Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium, pp.0967-0973, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-11-2, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.134
6. Sergiy Kril, Roman Fedoryshyn, Oleksandr Kril, Yevhen Pistun. Investigation of Functional Diagrams of Step PID Controllers for Electric Actuators // Procedia Engineering, Volume 100, 2015, Pages 1338-1347. doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.549
7. Fedoryshyn, R[oman]; Matiko, F[edir]; Pistun, O[leh]; Brylynskyi, R[oman] & Masniak, O[leh] (2020). Impulse Mode of Natural Gas Flow and Its Effect on Metering System Accuracy, Proceedings of the 31st DAAAM International Symposium, pp.0956-0962, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-29-7, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.133.
8. Fedoryshyn, R.; Matiko, F. & Pistun, Y. (2008). Prospects for Improving the Accuracy of Natural Gas Accounting and for Reducing Gas Unbalances (2008). 0485-0486, Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium, ISBN 978-3-901509-68-1, ISSN 1726-9679, pp. 243, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2008.
9. Fedoryshyn, R.; Lesovoi, L. & Pistun, Y. (2010). "Raskhod-RU" CAD system for computer aided calculation and design of flowmeters for fluid energy carriers (2010).

0557-0558, Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium, ISBN 978-3-901509-68-1, ISSN 1726-9679, pp. 347, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2010.

10. Y. Pistun, F. Matiko and R. Fedoryshyn. Improvement of accuracy of natural gas metering by means of household gas meters // Proceedings of 16th International Flow Measurement Conference “FLOMEKO 2013”, Paris, France – 24-26.09.2013, p. 306-310.

Статті у наукових фахових виданнях України:

11. Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R. Automation and optimization of solid material grinding by means of ball mills // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. Дніпропетровськ – 2011 р., № 36, том 1, с. 122-127.
12. Y. Pistun, V. Zahray, H. Nykolyn and R. Fedoryshyn. Improvement of the ball mill automation and optimization system for solid material grinding // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. Дніпропетровськ – 2012 р., № 38, с. 117-121.
13. Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Николин Г. А., Заграй В. С. Побудова математичної моделі кульового барабанного млина із застосуванням отриманих експериментальних даних // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні: український міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2019. – Вип. 53. – С. 44–55.
14. R. Fedoryshyn, S. Klos, V. Savytskyi, O. Masniak. Identification of controlled plant and development of its model by means of PLC. Energy Eng. Control Syst., 2016, Vol. 2, No. 2, pp. 69 – 78. <https://doi.org/10.23939/jeecs2016.02.069>
15. R. Fedoryshyn, S. Klos, V. Savytskyi, S. Kril. Improvement of pulse-width modulation algorithm for thermal plant control. Energy Eng. Control Syst., 2017, Vol. 3, No. 2, pp. 63 – 72. <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.02.063>
16. R. Fedoryshyn, S. Klos, V. Savytskyi, Y. Pistun, M. Woloszyn. Design of optimal filter for analog signal. Energy Eng. Control Syst., 2018, Vol. 4, No. 2, pp. 93 – 102. <https://doi.org/10.23939/jeecs2018.02.093>
17. Лесовой Л. В., Федоришин Р. М. Вимірювання витрати сухої частини вологого природного газу методом змінного перепаду тиску // Науково-технічний журнал “Методи та прилади контролю якості” Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. - 2006. - №16. - С. 47-50.
18. Федоришин Р. М., Грень Я.В., Матіко Ф. Д. Моделювання динамічних характеристик пневматичних ліній витратомірів змінного перепаду тиску // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. -2009. - № 659. - С. 73-78.
19. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Костик І. В., Грень Я. В. Аналіз причин виникнення додаткових похибок витратомірів змінного перепаду тиску в умовах нестационарного потоку // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація. - 2010. - № 677. - С. 79-86.
20. Ф. Матіко, Р. Федоришин. Вплив резонансних явищ у пневматичних лініях витратомірів змінного перепаду тиску на похибку вимірювання витрати

- пульсуючого потоку // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. -2011. - № 712. - С. 104-112.
21. Ф. Матіко, В. Роман, Р. Федоришин. Порівняльний аналіз методів визначення швидкості звуку // Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та метрологія”, випуск 73, В-во Львівської політехніки. -2012. - С. 56-62.
 22. R. Fedoryshyn, F. Matiko, I. Kostyk, Y. Pistun. Investigation of differential pressure flowmeters accuracy in pulsating flows. *Energy Eng. Control Syst.*, 2016, Vol. 2, No. 1, pp. 9 – 18. <https://doi.org/10.23939/jeecs2016.01.009>
 23. Р.М. Федоришин, Є.П. Пістун, В.К. Савицький. Підвищення точності обліку природного газу за імпульсних режимів роботи витратомірних вузлів на теплогенеруючих об’єктах // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. - 2014. - № 795. - С. 62-66.
 24. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Вплив температурного режиму газопроводу на точність вимірювання витрати природного газу методом змінного перепаду тиску // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. -2008. - № 617. - С. 100-107.
 25. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Проектування теплоізоляції вузлів обліку природного газу з метою усунення додаткових похибок вимірювання витрати // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Автоматика, вимірювання та керування. -2009. - № 639. - С. 152-158.
 26. Є. Пістун, Ф. Матіко, Р. Федоришин. Вплив теплообмінних процесів на точність вимірювання об’єму природного газу // Науково-виробничий журнал “Метрологія та прилади” Харківського національного університету радіоелектроніки. - № 4(24), 2010. - С. 13-19.
 27. Є.П. Пістун, Ф.Д. Матіко, Р.М. Федоришин. Експериментальне дослідження додаткової похибки вимірювання температури потоку природного газу // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”: Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація. -2013. - № 758. - С. 178-183.
 28. Yevhen Pistun, Leonid Lesovoy and Roman Fedoryshyn. Design of flowmeters for fluid energy carriers by means of “Raskhod-RU” CAD // *Computational Problems of Electrical Engineering*. Vol. 3, No. 1. – 2013. p. 79-86

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:

29. Pistun, Y[evhen]; Zagraj, V[olodymyr]; Nykolyn, H[ryhoriy] & Fedoryshyn, R[oman](2012). Automation and optimization of coal grinding by means of ball mills, Chapter 08 in DAAAM International Scientific Book 2012, pp. 087-094, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-901509-86-5, ISSN 1726-9687, Vienna, Austria. pp. 087-094.
30. Pistun Ye. P., Zahray V. S., Nykolyn H. A. and Fedoryshyn R. M. Optimization of ball mill performance for coal grinding // *Proc. of XIII Forum of Power Engineers*, Opole Univ. of Techn., April 25-27, Szczyrk (Poland), 2012, ISSN 1899-0886, pp. 158-159, “Nowa Energia” Publ.House, Raciborz (Poland)

31. I. Kostyk, F. Matiko, R. Fedoryshyn. Effect of flow pulsations on the accuracy of differential pressure flowmeters. *Challenges of Modern Technology*, Vol. 8, No. 1, 2017, pp. 23-31.
32. Yevhen Pistun, Roman Fedoryshyn. Effect of impulse mode of flow on the accuracy of natural gas metering // *Proc. of XV Forum of Power Engineers GRE 2016*, Opole Univ. of Techn., June 27-29, Szczyrk (Poland), 2016, ISSN 1899-0886, pp. 105-106, “Nowa Energia” Publ.House, Raciborz (Poland)
33. Roman Fedoryshyn, Yevhen Pistun, Fedir Matiko. Effect of flow temperature measurement error on the accuracy of natural gas metering // *Proc. of XVI Forum of Power Engineers GRE 2018*, Opole Univ. of Techn., June 25-26, 2018. Szczyrk (Poland), ISSN 1899-0886, *Nowa Energia*, 2(62), p. 91.
34. Pistun, Y. , Lesovoy, L. , Matiko, F. and Fedoryshyn, R. (2014) Computer aided design of differential pressure flow meters. *World Journal of Engineering and Technology*, 2, 68-77. doi: 10.4236/wjet.2014.22009.

АНОТАЦІЯ

Федоришин Р. М. Імпульсні регулятори нелінійних систем керування в тепловій енергетиці. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – “Автоматизація процесів керування”. – Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, 2021.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-технічної проблеми – керування нелінійними об’єктами за допомогою імпульсних регуляторів з метою підвищення ефективності та надійності роботи як технологічного обладнання, так і пристроїв систем автоматизації в тепловій енергетиці, зокрема для теплових об’єктів, для теплогенеруючого обладнання, а також для процесу розмелювання вугілля за допомогою кульових барабанних млинів на теплових електростанціях.

У роботі виконано огляд існуючих схем імпульсних ПІД-регуляторів, проаналізовано конфігурації цих схем з їх параметрами налаштування та досліджено точність імпульсних ПІД-регуляторів на базі таких схем: імпульсний ПІД-регулятор з подвійним диференціюванням, ПІД-регулятор з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором, ПІД-регулятор з імпульсним перетворювачем, а також ПІ-регулятор з генератором імпульсів. Запропоновано нову класифікацію схем автоматичних регуляторів. Представлено удосконалений алгоритм широтно-імпульсної модуляції в імпульсному ПІД-регуляторі для керування тепловим об’єктом та розроблено методику розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу на вході автоматичного регулятора. Виконано дослідження нелінійних об’єктів регулювання, зокрема тепловий об’єкт (електрична піч) та кульовий барабанний млин для розмелювання вугілля на тепловій електростанції. На основі отриманих експериментальних даних побудовано математичні моделі вказаних

об'єктів регулювання та виконано розрахунок автоматичних регуляторів для них. Розроблено алгоритм управління кульовим барабанним млином для оптимізації його завантаженості. Проаналізовано ефективність роботи теплогенеруючих об'єктів із врахуванням похибок обліку енергоносіїв. Розроблено математичні моделі похибок вимірювання температури природного газу, зумовлених інерційністю термоперетворювача в імпульсних режимах протікання газу та теплообміном між потоком газу і корпусом лічильника газу. Запропоновано заходи для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

Ключові слова: автоматичний регулятор, нелінійний об'єкт, імпульсний сигнал, математична модель, алгоритм керування, похибка, енергоносіїв.

АННОТАЦИЯ

Федоришин Р. М. Импульсные регуляторы нелинейных систем управления в тепловой энергетике. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – “Автоматизация процессов управления”. – Национальный университет “Львовская политехника”, г. Львов, 2021.

Диссертация посвящена решению научно-технической проблемы – управления нелинейными объектами с помощью импульсных регуляторов с целью повышения эффективности и надежности работы как технологического оборудования, так и устройств систем автоматизации в тепловой энергетике, в частности для тепловых объектов, для теплогенерирующего оборудования, а также для процесса размола угля с помощью шаровых барабанных мельниц на тепловых электростанциях.

В работе выполнен обзор существующих схем импульсных ПИД-регуляторов, проанализированы конфигурации этих схем с их параметрами настройки и исследована точность импульсных ПИД-регуляторов на базе таких схем: импульсный ПИД-регулятор с двойным дифференцированием, ПИД-регулятор с дифференциатором и широтно-импульсным модулятором, ПИД-регулятор с импульсным преобразователем, а также ПИ-регулятор с генератором импульсов. Предложена новая классификация схем автоматических регуляторов. Представлен усовершенствованный алгоритм широтно-импульсной модуляции в импульсном ПИД-регулятора для управления тепловым объектом и разработана методика расчета оптимального фильтра аналогового сигнала на входе автоматического регулятора. Выполнены исследования нелинейных объектов регулирования таких как тепловой объект (электрическая печь) и шаровая барабанная мельница для размола угля на тепловой электростанции. На основе полученных экспериментальных данных построены математические модели указанных объектов регулирования и выполнен расчет автоматических регуляторов для них. Разработан алгоритм управления шаровой барабанной мельницей для оптимизации ее загрузки. Проанализирована эффективность работы теплогенерирующих

объектов с учетом погрешностей учета энергоносителей. Разработаны математические модели погрешностей измерения температуры природного газа, обусловленных инерционностью термопреобразователя в импульсных режимах протекания газа и теплообменом между потоком газа и корпусом счетчика газа. Предложены мероприятия для повышения точности автоматизированных систем учета природного газа на теплогенерирующих объектах.

Ключевые слова: автоматический регулятор, нелинейный объект, импульсный сигнал, математическая модель, алгоритм управления, погрешность, энергоноситель.

ABSTRACT

Fedoryshyn R. M. Step controllers of nonlinear control systems in thermal power engineering. – Manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Technical Sciences by the specialty of 05.13.07 – “Automation of control processes”. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2021.

The dissertation is devoted to the solution of the scientific and technical problem of control of nonlinear objects by means of step controllers for the purpose of increasing efficiency and reliability of work of both technological equipment and devices of automation systems for thermal objects, for heat generating equipment, as well as for the process of grinding of coal by means of ball drum mills at thermal power stations.

The diagrams of step controllers working in conjunction with the actuators of the integrating action have been analyzed in the work. The following diagrams have been analyzed: step PID controller with double differentiation, PID controller with a differentiator and a pulse-width modulator, PID controller with a pulse converter, as well as PI-controller with a pulse generator. The accuracy of the step controllers has been analyzed. A new classification of diagrams of automatic controllers is proposed. Analysis of pulse-width modulation (PWM) algorithms has been performed. An improved PWM algorithm based on a sawtooth waveform generator is proposed. A methodology is developed to design the optimal filter of analog signal at the input of an automatic controller. Experimental studies were carried out for a thermal object (electric furnace) and a ball drum mill for coal grinding. Mathematical models of the controlled objects were built on the basis of the obtained experimental data. Automatic controllers were designed for these objects. An improved algorithm for automatic control of the ball drum mill operation is proposed. The accuracy of automated systems for measurement of flow rate and volume of fluid energy carriers (natural gas) has been analyzed. The influence of the inertia of a temperature transducer on the accuracy of gas metering in pulsed modes of the measurement system has been investigated. Heat exchange between the gas flow and a gas meter body has been studied. Measures have been developed to improve the accuracy of automated natural gas metering systems at heat-generating facilities.

Keywords: automatic controller, nonlinear object, pulse signal, mathematical model, control algorithm, error, energy carrier.