

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

*Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису*

Федоришин Роман Миронович

УДК 681.121/123; 532.57

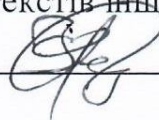
**ІМПУЛЬСНІ РЕГУЛЯТОРИ НЕЛІНІЙНИХ СИСТЕМ
КЕРУВАННЯ В ТЕПЛОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ**

Спеціальність: 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Галузь: 05 “Технічні науки”

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ Р. М. Федоришин

Науковий консультант –
доктор технічних наук,
професор **Є. П. Пістун**

Ідентичність усіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар

спеціалізованої вченої

ради Д 55.052.04




_____ **Ю. З. Вашкурак**

Львів – 2021

АНОТАЦІЯ

Федоришин Р. М. Імпульсні регулятори нелінійних систем керування в тепловій енергетиці. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, 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 процесу розмелювання вугілля за допомогою кульових барабанних млинів на теплових електростанціях, а також для теплогенеруючого обладнання.

Автоматизовані системи керування технологічними процесами застосовуються у всіх галузях промисловості, включаючи харчову, фармацевтичну, газову промисловість та енергетику. Основними перевагами автоматизованих систем керування технологічними процесами 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 різних галузей промисловості.

У роботі 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 з ПІД-регулятором та 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. 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. Запроваджено умовну нумерацію схем від 1 до 8. 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 запропоновано нові схеми елементів контура регулювання.

Виконано аналіз алгоритмів широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), 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 системі автоматичного регулювання (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 із зміщеним сигналом завдання шпаруватості.

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.

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.

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.

Проаналізовано кульовий барабанний млин (КБМ) 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.

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.

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 розмелювальну продуктивність млина при зміні характеристик сирого вугілля.

Запропоновано удосконалений алгоритм автоматичного керування роботою КБМ, відповідно до якого подача сирого вугілля у млин здійснюється за сигналом керування на базі виміряного значенням температури аеросуміші на виході КБМ відповідно до ПІ-закону регулювання. 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.

Проаналізовано точність автоматизованих систем обліку плинних енергоносіїв (природного газу). 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.

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.

Розроблено заходи для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах, що включають встановлення теплоізоляційної вставки між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу, а також встановлення теплоізоляції на вимірювальній ділянці трубопроводу. Виконання розроблених рекомендацій дозволить усунути вплив температурних умов протікання природного газу на точність вимірювання його витрати та об'єму за допомогою вузлів обліку, встановлених на теплогенеруючих об'єктах.

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

Список опублікованих 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, Editor B. Katalinic, 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, Editor B. Katalinic, 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/jeeecs2016.02.069>
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/jeeecs2017.02.063>
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/jeeecs2018.02.093>
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 довкілля. 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 довкілля. 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/jeccs2016.01.009>
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.

Тези доповідей на наукових конференціях, симпозіумах та семінарах:

35. Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R. Controller-optimizer of ball mill performance // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2011” – Львів 28-30.09.2011. – с. 406-407
36. Пістун Є.П., Заграй В.С., Николин Г.А., Федоришин Р.М. Регулятор-оптимізатор роботи кульового барабанного млина // Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 24-25 квітня 2012 р., Київ. – с. 251-252
37. Y. Pistun, V. Zahray, H. Nykolyn and R. Fedoryshyn. Improvement of a ball mill automation and optimization system // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2012” – Київ 26-28.09.2012. – с. 242-243
38. Хімко Н. І., Федоришин Р. М. Математична модель кульового барабанного млина // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології – 2013”. – Київ. – 2013. – С. 32-33.
39. Федоришин Р. М., Савицький В. К., Кльось С. Р. Схеми автоматичних регуляторів та їх класифікація // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 16-17 травня 2017 р., Київ. – с. 160-161
40. Федоришин Р. М., Савицький В. К., Кльось С. Р. Схеми імпульсних ПІД регуляторів // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 17-18 травня 2016 р., Київ. – с. 195-196
41. Fedoryshyn R., Savytskyi V., Klyos S. Experimental Study of an Electric Oven and Development of Its Mathematical Model // Proceedings of IX Annual Scientific

- Conference “Information Technologies and Automation – 2016”, Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 20-21.
42. Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos, Volodymyr Savytskyi. Development of Mathematical Model of Controlled Plant Using the Obtained Experimental Data // Proceedings of 6th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 24-26.11.2016. – p. 189-190.
43. Федоришин Р. М., Кльось С. Р. Побудова математичної моделі теплового об'єкту на основі отриманих експериментальних даних // Збірник тез доповідей 74-ї Студентської науково-технічної конференції, присвяченої 200-річчю з дня заснування Львівської політехніки, жовтень 2016 р., електронний опт. диск (CD-ROM), Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2016. – с. 94-95.
44. Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos. Analysis of Pulse-Width Modulation Methods // Proceedings of 7th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 23-25.11.2017. – p. 170-171.
45. Fedoryshyn R. M., Savytskyi V. K., Pistun Y. P., Klos S. R. Application of pulse-width modulator for thermal plant control // Матеріали XXV міжнародної конференції з автоматичного управління “АВТОМАТИКА/AUTOMATICS - 2018” – Львів 18-19.09.2018. – с. 161-162.
46. Sviatoslav Klos, Oleh Svyryd, Roman Fedoryshyn. Optimization of analog signal filtration process // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 129-130.
47. Федоришин Р., Грень Я., Матіко Ф. Аналіз причин появи похибок вимірювання витрати природного газу, зумовлених змінами параметрів нестационарного потоку // Матеріали I Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2009. – Львів. – 2009. – С. 73-74.
48. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Костик І. В. Дослідження резонансних явищ в імпульсних трубках витратомірів // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 21.

49. Костик І. В., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Дослідження резонансних явищ у пневматичних лініях вимірювальних перетворювачів систем обліку газу // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2013 р., Київ. – с. 252-253.
50. R. Fedoryshyn, F. Matiko, I. Kostyk and Y. Pistun. Systematic Error of Gas Flow Rate Measurement Caused by Flow Pulsation // Proceedings of 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, April 14-17, 2015, CDROM version, pp.1-12, Arlington, Virginia, USA.
51. I. Kostyk, F. Matiko, R. Fedoryshyn. Effect of Flow Pulsations on the Accuracy of Differential Pressure Flowmeters // Proceedings of Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015”, September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-8, Warsaw, Poland.
52. Roman Fedoryshyn, Fedir Matiko, Ihor Kostyk, Khrystyna Stefurak. Mathematical Modeling and Experimental Study of Impulse Lines of Flowmeters // Proceedings of 5th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 26-28.11.2015. –р. 178-179.
53. Костик І. В., Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д. Моделювання пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 17-18 травня 2016 р., Київ. – с. 203-204.
54. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Розроблення алгоритму розрахунку теплопровідності природного газу з метою уточнення впливу теплообмінних процесів на точність його обліку // Збірник праць 5-ї міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми економії енергії”. - Львів. - 2008. - С. 39-42.
55. Федоришин Р. М., Комарецький О. А. Вплив інерційності термоперетворювача на точність вузла обліку природного газу в імпульсних режимах роботи // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2013 р., Київ. – с. 256-257.
56. Федоришин Р., Комарецький О., Чура М. Математичне моделювання температурного режиму потоку газу в системах його обліку при імпульсних

- режимах роботи // Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2013. Наукове електронне видання на CD-ROM – Львів. – 21-23.11.2013. – С. 58-61.
57. Федоришин Р., Комарецький О., Чура М. Моделювання імпульсних режимів роботи системи автоматизованого обліку природного газу // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Наукове електронне видання. Випуск № 1, 2014 р. – С. 250-256.
58. Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Власюк Я. М., Ярошевич В. М. Динамічна похибка вимірювання температури природного газу внаслідок інерційності термоперетворювача // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 16-17 травня 2017 р., Київ. – с. 186-187.
59. Федоришин Р. М., Пістун О. І. Моделювання похибки вимірювання об’єму природного газу для імпульсного режиму потоку в системі обліку // Збірка тез тринадцятої міжнародної науково-практичної конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020)”, Київ, 19-20 травня 2020 р. – К: НАУ, 2020. – С. 145–147.
60. Федоришин Р. М., Брилинський Р. Б., Масняк О. Я., Пістун О. І. Вплив імпульсного режиму потоку природного газу на точність його обліку // Матеріали IV-тої всеукраїнської науково-практичної конференції “Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку”, Луцьк, 29-30 жовтня 2020 р. – Луцький НТУ, 2020. – С. 88–89.
61. Roman Fedoryshyn. Improvement of accuracy of natural gas flow rate measurement by means of orifice plates in gas heating systems // Papers of 5th Students’ Scientific Conference “Man – Civilization – Future”. Vol. 2. Wroclaw – 2007. - P. 137-145
62. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Побудова витратомірів газу, інваріантних до температурних змін потоку // Збірник тез доповідей п’ятої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2007. - С. 17-18.
63. Федоришин Р., Матіко Ф. Вплив теплообміну між гільзою термоперетворювача та трубопроводом на точність вимірювання температури природного газу в

- системах його обліку // Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2010. – Львів. – 2010. – С. 22-23.
64. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Крук С.Ю. Вплив теплообмінних процесів на похибку вимірювання витрати та об'єму з допомогою лічильників газу // Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 24-25 квітня 2012 р., Київ. – с. 244-245
65. Ye. Pistun, F. Matiko and R. Fedoryshyn. Additional Error of Flow Temperature Measurement and Its Influence on the Accuracy of Fluid Flowrate and Volume Measurement // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-18, Colorado Springs, Colorado, USA.
66. Федоришин Р. М., Демчишин І. Б. Теплообмін між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу в системах обліку природного газу // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2014 р., Київ. – с. 223-224
67. Федоришин Р. М., Чура М. В., Мот В. Р. Теплообмін між потоком газу та корпусом роторного лічильника в автоматизованій системі комерційного обліку природного газу // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Наукове електронне видання. Випуск № 2, 2014 р. – С. 37-42.
68. Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Аналіз додаткової систематичної похибки вимірювання температури потоку природного газу в системах його обліку // Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України “Облік природного газу та метрологія”, 13-17.03.2017 р., Львів. – с. 20-21.
69. Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Пістун Є. П. Особливості вимірювання температури потоку природного газу в системах його обліку // Збірник тез доповідей 4-ої Міжнародної наукової конференції “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах”, ВНТУ, 31.10–2.11.2017 р., Вінниця. – с. 238.
70. Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Пістун Є. П., Зубко Т. О. Аналіз та розрахунок температурних умов роботи побутових лічильників газу // Збірник матеріалів доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції пам'яті професора

- Ігоря Кісіля “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”, ІФНТУ нафти і газу, 14–16.11.2017 р., Івано-Франківськ. – с. 95-97
71. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Основні засади виконання аудиту систем обліку природного газу // Матеріали I Міжнародного конгресу “Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування”. – Львів. – 2009. – С. 127-128.
72. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Удосконалення методики проектування теплоізоляції витратомірів газу // Збірник тез доповідей шостої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2009. - С. 85-86.
73. R. Fedoryshyn, F. Matiko and Ye. Pistun. Influence of heat exchange processes on the accuracy of natural gas volume measurement // Papers of The 15th VDE/ITG/GMA Conference “Sensors and Measuring Systems 2010”. Nuremberg, Germany – 2010. – p. 597-601.
74. Є.П. Пістун, Ф.Д. Матіко, Р.М. Федоришин, Я.М. Власюк, В.М. Ярошевич Дослідження додаткових похибок вимірювання температури та об’єму природного газу в системах його обліку // Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірвальна техніка”. Том 2 - Харків. - 2010. - С. 192-195.
75. Федоришин Р., Матіко Ф. Методика виконання експертизи систем обліку енергоносіїв з метою підвищення їх точності // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології - 2011. – Київ. – 2011. – С. 59-60.
76. Рябцев Г., Федоришин Р., Матіко Ф. Розробка спрощеної методики розрахунку коефіцієнта стисливості коксового газу // Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2011. – Львів. – 2011. – С. 18-19.
77. Пістун Є.П., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Попередні результати впровадження нових комплексів стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 і ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2009 в Україні // Збірник тез доповідей сьомої

- всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 7.
78. Рябцев Г., Федоришин Р., Матіко Ф. Спрощена методика розрахунку коефіцієнта стисливості енерговмісних сумішей газів // Збірник тез доповідей 3-тньої науково-практичної конференції студентів і молодих учених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 133-134.
79. В. Роман, Ф. Матіко, Р. Федоришин. Методи визначення швидкості звуку в природному газі для вимірювання його витрати // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2012” – Київ 26-28.09.2012. – с. 436-437.
80. Ye. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn. “Raskhod-RU” CAD System for Computer Aided Design of Flowmeters for Fluid Energy Carriers // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-11, Colorado Springs, Colorado, USA.
81. Y. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn. New CAD system for designing the pressure differential flowmeters // Papers of The 16th International Conference on Sensors and Measurement Technology “SENSOR 2013”. Nuremberg, Germany – 2013. – p. 700-705.
82. Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д. Інтегрування сигналу витрати газу в турбінних лічильниках // Матеріали XXI міжнародної конференції з автоматичного управління “АВТОМАТИКА - 2014” – Київ 23-27.09.2014. – с. 168-169.
83. R. Fedoryshyn, Y. Pistun, F. Matiko, V. Roman. Improvement of Mathematical Model of Ultrasonic Flowmeter for Studying Its Errors in Disturbed Flows // Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF’15), Budapest, Hungary, September 01-04, 2015, pp.1-7.
84. V. Roman, F. Matiko, R. Fedoryshyn. CFD Simulation and Experimental Study of Ultrasonic Flowmeters // Proceedings of Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015”, September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-6, Warsaw, Poland.
85. Matiko F. D., Roman V. I., Fedoryshyn R. M., Pistun Y. P. Methodology of improvement of ultrasonic flowmeter mathematical model for studying its additional

- errors // Proceedings of IX Annual Scientific Conference “Information Technologies and Automation – 2016”, Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 16-17.
86. Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Крук С.Ю. Особливості визначення коефіцієнта стисливості природного газу для систем його обліку // Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України “Облік природного газу та метрологія”, 13-17.03.2017 р., Львів. – с. 11-14
87. Федоришин Р. М., Дичук П. В. Автоматизований розрахунок похибок вимірювання температури газу // Збірник тез доповідей 76-ї Студентської науково-технічної конференції, жовтень 2018 р., електронний опт. диск (CD-ROM), Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – с. 98-100.
88. Petro Dychuk, Roman Fedoryshyn. Computer-aided design of gas flow temperature measurement errors // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 135-137.
89. Матіко Ф. Д., Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Масняк О. Я. Методики визначення обсягів дійсних втрат газу в газорозподільних мережах // Збірник тез доповідей Всеукраїнського семінару-наради “Приладовий облік природного газу, його нормативно-правове та метрологічне забезпечення” (Запоріжжя, 27-31 травня 2019 р.). – 2019. – С. 20–23.

Патенти:

90. Пістун Є. П., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Мінін С. В. “Спосіб калібрування побутових лічильників газу”, патент України на корисну модель № 95014 від 10.12.2014 р., бюл. № 23, 2014.
91. Матіко Ф. Д., Пістун О. І., Федоришин Р. М. “Спосіб вимірювання об’єму газу, зведеного до стандартних умов”, патент України на корисну модель № 134376 від 10.05.2019 р., бюл. № 9, 2019.

SUMMARY

Fedoryshyn R. M. Step controllers of nonlinear control systems in thermal power engineering. - Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences according to speciality 05.13.07 "Automation of control processes". - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, 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 the process of grinding of coal by means of ball drum mills at thermal power stations, as well as for heat generating equipment.

Automated process control systems are used in all branches of economy, including food, pharmaceutical, gas and energy industries. The main advantages of automated process control systems are reduction of the impact of the so-called human factor on the technological process, minimization of the consumption of raw materials, improvement of the quality of the original product and a significant increase in production efficiency. Today, the control of nonlinear objects with the help of step controllers is a problem that remains insufficiently studied despite a significant number of publications devoted to the automation of technological processes. That is why the solution of this problem will contribute not only to improving the qualitative and quantitative indicators of the process of automatic control of technological equipment, but also to increasing the efficiency of enterprises in various industries.

The main diagrams of step controllers working in conjunction with the actuators of the integrating action have been analyzed in the work, in particular, the diagram of a step PID controller with double differentiation, a PID controller diagram with a differentiator and a pulse-width modulator, a diagram with a PID controller and a pulse converter, as well as a PI-controller diagram with a pulse generator. The performed

analysis makes it possible to determine the main structural elements, settings and properties of step controller diagrams in order to make it possible to make a decision on the use of specific controller diagrams for certain control plants. Based on the analysis of existing classifications of automatic controllers, it has been established that today the classifications of controllers are known according to a number of features (purpose, principle of operation, design features, type of energy used, nature of changes in regulatory action, etc.), but little attention is paid to the streamlining and classification of diagrams implemented in automatic controllers. A new classification of diagrams of automatic controllers with a control channel is proposed to better understand the differences between positional, continuous and step controllers and their place among other controllers. The peculiarity of the developed classification is that the classification features are located in a hierarchical manner. All possible combinations of types of control action on the control plant, the output signal of the controller and the control law are considered. Conventional numbering of circuits from 1 to 8 has been introduced. The classification developed facilitates the task of selecting and analyzing diagrams of automatic regulators for control of technological plants, as it provides a clear demonstration of all possible ways the automatic controller influences the control plant, taking into account the control law, the type of the output signal of the regulator and the type of control action on the object controlled. New diagrams for control loop elements are proposed on the basis of the classification developed.

Analysis of pulse-width modulation (PWM) algorithms has been performed, in particular, PWM based on a sawtooth waveform generator and PWM based on an integrator and a relay element. Mathematical dependencies to determine the settings of these algorithms are presented. An example of the use of PWM in an automatic controller to control a thermal object is given. A comparison of the quality of transient processes in an automated control system (ACS) based on a two-position controller and one based on a PID controller with PWM has been carried out. Since a bouncing of the output relay contact can occur in an ACS with a PID controller and PWM, an improved PWM algorithm based on a sawtooth waveform generator is proposed to eliminate this

undesirable phenomenon. The essence of the improved algorithm is to introduce an additional comparator to compare the output signal of the integrator with the offset signal of the duty cycle setting value.

A method is proposed for choosing the pulse period for PWM, taking into account the dynamic properties of the control plant. This makes it possible to set such a value of the pulse period at which there will be no oscillations of the controlled parameter in the equilibrium state. The use of the improved PWM algorithm and the proposed method for choosing the pulse period for PWM provides an increase in the reliability of the controller and an increase in the time life of its output relay contact.

A methodology is developed to calculate the optimal value of the exponential filter time constant based on the integral optimality criterion, which takes into account the quality indicator of the filtering process and the dynamic error of the filtered signal. The quality indicator is taken as the mean squared deviation of the filtered points from the averaged filtered points, the averaging being performed using a non-causal moving average filter. Using the experimental step response curve of a thermal object as an example, we calculated the optimal value of the exponential filter time constant, which is 2 s. For this value of the time constant, the effect of interference (noise) on the useful signal after filtering is reduced by almost 20 times, and the maximum dynamic error of the filtered signal is 1.33%. Application of the developed methodology for calculating the optimal value of the filter time constant in automated measurement and control systems will ensure a high quality of the filtering process with an insignificant dynamic error of the filtered signal.

An experimental study of a thermal object (electric furnace) was carried out, namely, transient processes were recorded by the regulation channel and the disturbance channel. Based on the obtained experimental data, a mathematical model of the controlled object is constructed, taking into account the nonlinear behavior of the object, including different dynamics during heating and during cooling. The adequacy of the model is confirmed by comparing the theoretical step response curves with the

experimental ones. The developed model was implemented in a programmable logic controller to simulate the control object as part of the automatic control system.

A ball drum mill (BDM) as a control object has been analyzed. It has been established that there is a clear relationship between the energy spent by the balls in the mill to excite the vibration of the BDM housing and the amount of material in its drum. This means that the vibration energy of the mill housing or its bearings can be used to judge the amount of material in its drum.

A mathematical model of the BDM in the form of a system of nonlinear differential equations has been built based on the laws of conservation of mass and heat, and on the equations of flow rate and heat transfer. Using the results of comparing the simulated transient processes and experimental data it has been determined that the developed model adequately describes the transient processes in the BDM.

An analysis of control algorithms for the operation of a ball drum mill for grinding coal has been carried out. Based on the analysis, it has been found that the disadvantages of the existing algorithms are that they do not provide the maximum possible grinding performance of the mill when the characteristics of raw coal change.

An improved algorithm for automatic control of the BDM operation is proposed, according to which the supply of raw coal to the mill is carried out according to a control signal based on the measured value of the temperature of the air mixture at the outlet of the BDM in accordance with the PI-law of regulation. The algorithm provides protection for such parameters as vibration of the front bearing support, pressure drop across the mill, and temperature of the air mixture at the mill outlet. In addition, measurement of one more parameter is provided, that of vibration of the rear bearing support. This signal correlates with the amount of coal in the rear of the mill drum and provides additional protection against mill blockage to increase the reliability of the BDM in automatic mode.

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. Based on the simulation, it was found that under conditions when the gas flow temperature is lower than the ambient air temperature in the boiler room, the error in measuring the gas volume is negative due to the inertia of the temperature transducer. The magnitude of the error depends on the thermal inertia of the temperature transducer (time constant), the gas flow rate, the temperature difference between the gas flow and the ambient air, and the period (frequency) of the gas flow rate pulses. For the natural gas metering unit under consideration, the inertia of the temperature transducer under pulsed flow regimes can lead to underestimation of 6 m^3 of gas per day, which is 180 m^3 per month.

On the basis of experimental studies, a mathematical model of the error caused by heat exchange between the gas flow and the gas meter body has been developed, which is based on the correlation dependence between the linear heat transfer coefficient (from the gas flow to the ambient air) and the equivalent length of the straight section of the pipeline. The developed error model makes it possible to determine the effect of heat transfer between the gas flow and the meter body on the accuracy of natural gas volume measurement for metering units based on a rotary meter, where the temperature transducer is installed downstream of the meter.

Measures have been developed to improve the accuracy of automated natural gas metering systems at heat-generating facilities, including the installation of a heat-insulating insert between the temperature transducer sleeve and the pipeline wall, as well as the installation of thermal insulation at the measuring section of the pipeline. Implementation of the developed recommendations will allow eliminating the influence of temperature conditions of natural gas flow on the accuracy of measuring its flow rate and volume using metering units installed at heat generating facilities.

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

List of publications on the topic of the dissertation

Collective monograph:

1. Pistun Ye. P., Zahray V. S., Nykolyn H. A. and Fedoryshyn R. M. Optimization of ball mill performance for coal grinding // Selected issues of the energy renovation management, under ed. S. Zatora i M. Tomaszewskiego (Opole University of Technology), 2012, ISBN “Nowa Energia” 978-83-928582-8-7, 2012, p. 145-153.

Papers in scientific journals included in the Scopus and Web of Science databases:

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, Editor B. Katalinic, 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, Editor B. Katalinic, 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.

Papers in scientific journals of Ukraine:

11. Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R. Automation and optimization of solid material grinding by means of ball mills // Collection of scientific papers of the National Mining University. Dnipropetrovsk - 2011, No. 36, Volume 1, p. 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 // Collection of scientific papers of the National Mining University. Dnipropetrovsk – 2012, No. 38, 117-121.
13. Pistun Y. P., Fedoryshyn R. M., Nykolyn H. A., Zagraj V. S. Construction of a mathematical model of a ball drum mill using the obtained experimental data // Automation of production processes in mechanical engineering and instrument making: Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection. - 2019. - Issue 53. - P. 44–55. (in Ukrainian)
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. Lesovoi L. V., Fedoryshyn R. M. Measurement of dry part flow rate of humid natural gas by the method of variable pressure drop // Scientific and technical journal "Methods and devices for quality control" Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - 2006. - No. 16. - p. 47-50. (in Ukrainian)
18. Fedoryshyn R. M., Hren Y. V., Matiko F. D. Modeling of dynamic characteristics of pneumatic lines of variable pressure flow meters // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. -2009. - No. 659. - p. 73-78. (in Ukrainian)
19. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M., Kostyk I. V., Hren Y. V. Analysis of the causes of additional errors in variable pressure drop flow meters under unsteady flow conditions

- // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. - 2010. - No. 677. - p. 79-86. (in Ukrainian)
20. F. Matiko, R. Fedoryshyn. Influence of resonance phenomena in pneumatic lines of variable pressure drop meters on the error in measuring the flow rate of a pulsating flow // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. - 2011. - No. 712. - p. 104-112. (in Ukrainian)
 21. F. Matiko, V. Roman, R. Fedoryshyn. Comparative analysis of methods for determining the speed of sound // Interdepartmental scientific and technical collection "Measuring equipment and metrology", issue 73, Lviv Polytechnic University Publishing House. -2012. - P. 56-62. (in Ukrainian)
 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/jeeecs2016.01.009>
 23. R. M. Fedoryshyn, Y. P. Pistun, V. K. Savytskyi. Improvement of the accuracy of natural gas metering in pulsed modes of operation of flow units at heat generating facilities // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. - 2014. - No. 795. - p. 62-66. (in Ukrainian)
 24. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Influence of gas pipeline temperature regime on accuracy of natural gas flow measurement by variable pressure drop method // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. - 2008. - No. 617. - p. 100-107. (in Ukrainian)
 25. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Design of thermal insulation of natural gas metering units in order to eliminate additional errors in flow measurement // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. -2009. - No. 639. - p. 152-158. (in Ukrainian)
 26. Y. Pistun, F. Matiko, R. Fedoryshyn. Influence of heat exchange processes on the accuracy of natural gas volume measurement // Research and production journal "Metrology and instruments" of Kharkiv National University of Radio Electronics. – No. 4 (24), 2010. - P. 13-19. (in Ukrainian)

27. Y. P. Pistun, F. D. Matiko, R. M. Fedoryshyn. Experimental study of the additional error in measuring the temperature of a natural gas flow // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic": Heat power engineering. Environmental Engineering. Automation. -2013. - No. 758. - p. 178-183. (in Ukrainian)
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.

Papers in scientific periodicals of other countries:

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.

Abstracts of papers delivered at scientific conferences, symposia and seminars:

35. Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R. Controller-optimizer of ball mill performance // Proceedings of the XVIII International Conference on Automatic Control "Automation / Automatics - 2011" - Lviv 28-30.09.2011. - p. 406-407.
36. Pistun Y. P., Zagraj V. S., Nykolyn H. A., Fedoryshyn R. M. Regulator-optimizer of the ball drum mill // Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", April 24-25, 2012, Kyiv. - p. 251-252. (in Ukrainian)
37. Y. Pistun, V. Zahray, H. Nykolyn and R. Fedoryshyn. Improvement of a ball mill automation and optimization system // Proceedings of the XIX International Conference on Automatic Control "Automation / Automatics - 2012" - Kyiv 26-28.09.2012. - p. 242-243.
38. Khimko N. I., Fedoryshyn R. M. Mathematical model of a ball drum mill // Proceedings of the III Ukrainian scientific-practical conference of young scientists, students and graduate students "Automation and computer-integrated technologies - 2013". - Kyiv. - 2013. - P. 32-33. (in Ukrainian)
39. Fedoryshyn R. M., Savytskyi V. K., Klos S. R. Diagrams of automatic controllers and their classification // Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", May 16-17, 2017, Kyiv. - p. 160-161. (in Ukrainian)
40. Roman Fedoryshyn. Improvement of accuracy of natural gas flow rate measurement by means of orifice plates in gas heating systems // Papers of 5th Students' Scientific Conference "Man – Civilization – Future". Vol. 2. Wroclaw – 2007. - P. 137-145
41. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Construction of gas flow meters that are invariant to temperature changes in the flow // Collection of abstracts of the fifth all-Ukrainian scientific and technical conference "Measurement of gas flow and quantity ". - Ivano-Frankivsk. - 2007. - p. 17-18. (in Ukrainian)
42. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Development of an algorithm for calculating the thermal conductivity of natural gas in order to clarify the effect of heat exchange processes on the accuracy of gas accounting // Proceedings of the 5th International

- Scientific and Practical Conference "Problems of Energy Saving". - Lviv. - 2008. - P. 39-42. (in Ukrainian)
43. Fedoryshyn R., Hren Y., Matiko F. Analysis of the causes of errors in measuring the flow rate of natural gas caused by changes in the parameters of the unsteady flow // Proceedings of the I International Conference of Young Scientists EPECS-2009. - Lviv. - 2009. - P. 73-74. (in Ukrainian)
 44. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Basic principles of performing audit of natural gas metering systems // Proceedings of the First International Congress "Environmental Protection. Energy saving. Balanced nature management ". - Lviv. - 2009. - P. 127-128. (in Ukrainian)
 45. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Improvement of the methodology for the design of thermal insulation of gas flow meters // Collection of abstracts of the sixth all-Ukrainian scientific and technical conference "Measurement of gas consumption and quantity". - Ivano-Frankivsk. - 2009. - P. 85-86. (in Ukrainian)
 46. R. Fedoryshyn, F. Matiko and Ye. Pistun. Influence of heat exchange processes on the accuracy of natural gas volume measurement // Papers of The 15th VDE/ITG/GMA Conference "Sensors and Measuring Systems 2010". Nuremberg, Germany – 2010. – p. 597-601.
 47. Y. P. Pistun, F. D. Matiko, R. M. Fedoryshyn, Y. M. Vlasiuk, V. M. Yaroshevych. Investigation of additional errors in measuring the temperature and volume of natural gas in metering systems // Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Metrology and Measurement Technology". Volume 2 - Kharkiv. - 2010. - P. 192-195. (in Ukrainian)
 48. Fedoryshyn R., Matiko F. Influence of heat exchange between the thermocouple sleeve and the pipeline on the accuracy of natural gas temperature measurement in metering systems // Proceedings of the II International Conference of Young Scientists EPECS-2010. - Lviv. - 2010. - P. 22-23. (in Ukrainian)
 49. Fedoryshyn R., Matiko F. Methodology for the examination of energy accounting systems in order to improve their accuracy // Proceedings of the I All-Ukrainian scientific-practical conference of young scientists, students and graduate students Automation and computer-integrated technologies - 2011. - Kyiv. - 2011. - P. 59-60. (in Ukrainian)

50. Ryabtsev H., Fedoryshyn R., Matiko F. Development of a simplified procedure for calculating the compressibility factor of coke oven gas // Proceedings of the III International Conference of Young Scientists EPECS-2011. - Lviv. - 2011. - P. 18-19. (in Ukrainian)
51. Pistun Y. P., Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Preliminary results of implementation of new sets of standards GOST 8.586.1,2,3,4,5-2005 and DSTU GOST 8.586.1,2,3,4,5-2009 in Ukraine // Collection of abstracts of the seventh All-Ukrainian scientific and technical conference "Measurement of gas flow rate and quantity". - Ivano-Frankivsk. - 2011. - P. 7. (in Ukrainian)
52. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M., Kostyk I. V. Study of resonance phenomena in impulse tubes of flow meters // Collection of abstracts of the seventh All-Ukrainian scientific and technical conference "Measurement of gas flow rate and quantity". - Ivano-Frankivsk. - 2011. - P. 21. (in Ukrainian)
53. Ryabtsev H., Fedoryshyn R., Matiko F. Simplified method for calculating the compressibility coefficient of energy-containing gas mixtures // Collection of abstracts of the 3rd scientific-practical conference of students and young scientists "Methods and means of non-destructive testing of industrial equipment." - Ivano-Frankivsk. - 2011. - P. 133-134. (in Ukrainian)
54. Matiko F. D., Fedoryshyn R. M., Kruk S. Y. Influence of heat exchange processes on the error in measuring flow and volume using gas meters // Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", April 24-25, 2012, Kyiv. - p. 244-245. (in Ukrainian)
55. V. Roman, F. Matiko, R. Fedoryshyn. Methods for determining the speed of sound in natural gas to measure the flow rate // Proceedings of the XIX International Conference on Automatic Control "Automation / Automatics - 2012" - Kyiv 26-28.09.2012. - p. 436-437. (in Ukrainian)
56. Ye. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn. "Raskhod-RU" CAD System for Computer Aided Design of Flowmeters for Fluid Energy Carriers // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-11, Colorado Springs, Colorado, USA.
57. Ye. Pistun, F. Matiko and R. Fedoryshyn. Additional Error of Flow Temperature Measurement and Its Influence on the Accuracy of Fluid Flowrate and Volume

- Measurement // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-18, Colorado Springs, Colorado, USA.
58. Fedoryshyn R. M., Komaretskyi O. A. Influence of the inertia of a thermal converter on the accuracy of a natural gas metering unit in pulsed operating modes // Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", April 23-24, 2013, Kyiv. - p. 256-257. (in Ukrainian)
59. Kostyk I. V., Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Study of resonant phenomena in pneumatic lines of measuring transducers of gas metering systems // Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", April 23-24, 2013, Kyiv. - p. 252-253. (in Ukrainian)
60. Y. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn. New CAD system for designing the pressure differential flowmeters // Papers of The 16th International Conference on Sensors and Measurement Technology "SENSOR 2013". Nuremberg, Germany – 2013. – p. 700-705.
61. Fedoryshyn R., Komaretskyi O., Chura M. Mathematical modeling of gas flow temperature regime in gas metering systems at pulse operating modes // Proceedings of the IV International Conference of Young Scientists EPECS-2013. Scientific electronic edition on CD-ROM - Lviv. - 21-23.11.2013. - P. 58-61. (in Ukrainian)
62. Fedoryshyn R., Komaretskyi O., Chura M. Modeling of pulse modes of operation of an automated natural gas metering system // Proceedings of Ukrainian scientific-practical Internet conference of young scientists and students "Actual problems of automation and control". Scientific electronic edition. Issue No. 1, 2014 - P. 250-256. (in Ukrainian)
63. Fedoryshyn R. M., Demchyshyn I. B. Heat exchange between the thermocouple sleeve and the pipeline wall in natural gas metering systems // Proceedings of the XIII International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", April 23-24, 2014, Kyiv. - p. 223-224. (in Ukrainian)
64. Pistun Y. P., Fedoryshyn R. M., Matiko F. D. Integration of gas flow signal in turbine meters // Proceedings of the XXI International Conference on Automatic Control "AUTOMATION - 2014" - Kyiv 23-27.09.2014. - p. 168-169. (in Ukrainian)

65. Fedoryshyn R. M., Chura M. V., Mot V. R. Heat exchange between the gas flow and the rotor meter housing in the automated system of commercial natural gas metering // Proceedings of the International Scientific and Practical Internet Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control". Scientific electronic edition. Issue No. 2, 2014 - P. 37-42. (in Ukrainian)
66. R. Fedoryshyn, F. Matiko, I. Kostyk and Y. Pistun. Systematic Error of Gas Flow Rate Measurement Caused by Flow Pulsation // Proceedings of 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, April 14-17, 2015, CDROM version, pp.1-12, Arlington, Virginia, USA.
67. R. Fedoryshyn, Y. Pistun, F. Matiko, V. Roman. Improvement of Mathematical Model of Ultrasonic Flowmeter for Studying Its Errors in Disturbed Flows // Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'15), Budapest, Hungary, September 01-04, 2015, pp.1-7.
68. V. Roman, F. Matiko, R. Fedoryshyn. CFD Simulation and Experimental Study of Ultrasonic Flowmeters // Proceedings of Conference "Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015", September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-6, Warsaw, Poland.
69. I. Kostyk, F. Matiko, R. Fedoryshyn. Effect of Flow Pulsations on the Accuracy of Differential Pressure Flowmeters // Proceedings of Conference "Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015", September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-8, Warsaw, Poland.
70. Roman Fedoryshyn, Fedir Matiko, Ihor Kostyk, Khrystyna Stefurak. Mathematical Modeling and Experimental Study of Impulse Lines of Flowmeters // Proceedings of 5th International Youth Science Forum "Litteris et Artibus". Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 26-28.11.2015. –p. 178-179.
71. Fedoryshyn R. M., Savytskyi V. K., Klos S. R. Pulse PID control circuits // Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", May 17-18, 2016, Kyiv. - p. 195-196. (in Ukrainian)
72. Kostyk I. V., Fedoryshyn R. M., Matiko F. D. Modeling Pneumatic Lines of Pressure Transducers // Proceedings of the XV International Scientific and

- Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", May 17-18, 2016, Kyiv. - p. 203-204. (in Ukrainian)
73. Fedoryshyn R., Savytskyi V., Klos S. Experimental Study of an Electric Oven and Development of Its Mathematical Model // Proceedings of IX Annual Scientific Conference "Information Technologies and Automation – 2016", Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 20-21.
74. Matiko F. D., Roman V. I., Fedoryshyn R. M., Pistun Y. P. Methodology of improvement of ultrasonic flowmeter mathematical model for studying its additional errors // Proceedings of IX Annual Scientific Conference "Information Technologies and Automation – 2016", Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 16-17.
75. Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos, Volodymyr Savytskyi. Development of Mathematical Model of Controlled Plant Using the Obtained Experimental Data // Proceedings of 6th International Youth Science Forum "Litteris et Artibus". Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 24-26.11.2016. – p. 189-190.
76. Fedoryshyn R. M., Klos S. R. Construction of a mathematical model of a thermal object on the basis of the obtained experimental data // Collection of abstracts of the 74th Student Scientific and Technical Conference dedicated to the 200th anniversary of the founding of Lviv Polytechnic, October 2016, electronic opt. disk (CD-ROM), Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. - p. 94-95. (in Ukrainian)
77. Pistun Y. P., Matiko F. D., Fedoryshyn R. M. Analysis of an additional systematic error in measuring the temperature of a natural gas flow in metering systems // Ukrainian seminar-meeting of NJSC Naftogaz of Ukraine "Natural Gas Accounting and Metrology", March 13-17, 2017, Lviv. - p. 20-21. (in Ukrainian)
78. Fedoryshyn R. M., Matiko F. D., Vlasiuk Y. M., Yaroshevyh V. M. Dynamic error of natural gas temperature measurement due to inertia of the thermal converter // Proceedings of the XVI International Scientific and Technical Conference "Instrument Making: Status and Prospects", NTUU "KPI", May 16-17, 2017, Kyiv. - p. 186-187. (in Ukrainian)
79. Fedoryshyn R. M., Matiko F. D., Pistun Y. P. Specifics of measuring the temperature of a natural gas flow in metering systems // Proceedings of the 4th

- International Scientific Conference "Measurement, control and diagnostics in technical systems", VNTU, 31.10-2.11.2017, Vinnytsia. - p. 238. (in Ukrainian)
80. Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos. Analysis of Pulse-Width Modulation Methods // Proceedings of 7th International Youth Science Forum "Litteris et Artibus". Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 23-25.11.2017. – p. 170-171.
81. Fedoryshyn R. M., Matiko F. D., Pistun Y. P., Zubko T. O. Analysis and calculation of temperature conditions for the operation of household gas meters // Proceedings of the 8th International Scientific and Technical Conference in Memory of Professor Igor Kisil "Modern devices, materials and technologies for non-destructive testing and technical diagnostics of machine-building and oil and gas equipment", IFNTU Oil and Gas, 14-16.11.2017, Ivano -Frankivsk. - p. 95-97. (in Ukrainian)
82. Fedoryshyn R. M., Savytskyi V. K., Pistun Y. P., Klos S. R. Application of pulse-width modulator for thermal plant control // Proceedings of the XXV International Conference on Automatic Control "AUTOMATICS - 2018" - Lviv 18-19.09.2018. - p. 161-162. (in Ukrainian)
83. Sviatoslav Klos, Oleh Svyryd, Roman Fedoryshyn. Optimization of analog signal filtration process // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum "Litteris et Artibus" & 13th International Conference "Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology". Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 129-130.
84. Fedoryshyn R. M., Pistun O. I. Modeling of natural gas volume measurement error for pulse flow regime in the metering system // Proceedings of the thirteenth international scientific-practical conference "Integrated intelligent robotic systems (IIRTC-2020)", Kyiv, May 19-20, 2020 - K: NAU, 2020. - P. 145-147. (in Ukrainian)
85. Fedoryshyn R. M., Brylynskyi R. B., Masnyak O. Y., Pistun O. I. Influence of the pulse mode of natural gas flow on the measurement accuracy // Proceedings of the IV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Instrument Making and Metrology: Modern Problems, Development Trends", Lutsk, October 29-30, 2020 - Lutsk NTU, 2020. - P. 88-89. (in Ukrainian)

86. Pistun Y. P., Matiko F. D., Fedoryshyn R. M., Kruk S. Y. Specifics of determining the compressibility factor of natural gas for metering systems // Ukrainian seminar-meeting of NJSC Naftogaz of Ukraine “Natural Gas Accounting and Metrology”, March 13-17, 2017, Lviv. - p. 11-14. (in Ukrainian)
87. Fedoryshyn R. M., Dychuk P. V. Automated calculation of gas temperature measurement errors // Proceedings of the 76th Student Scientific and Technical Conference, October 2018, electronic opt. disk (CD-ROM), Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2018. - p. 98-100. (in Ukrainian)
88. Petro Dychuk, Roman Fedoryshyn. Computer-aided design of gas flow temperature measurement errors // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 135-137.
89. Matiko F. D., Pistun Y. P., Fedoryshyn R. M., Masnyak O. Y. Methods for determining the volume of actual gas losses in gas distribution networks // Proceedings of the All-Ukrainian seminar-meeting "Instrumental accounting of natural gas, its regulatory and metrological support" (Zaporizhzhia, May 27-31, 2019). - 2019. - P. 20–23. (in Ukrainian)

Patents:

90. Pistun Y. P., Matiko F. D., Fedoryshyn R. M., Minin S. V. "Method for calibrating household gas meters", patent of Ukraine for utility model No. 95014 dated December 10, 2014, Bul. No. 23, 2014. (in Ukrainian)
91. Matiko F. D., Pistun O. I., Fedoryshyn R. M. "Method for measuring the volume of gas reduced to standard conditions", patent of Ukraine for utility model No. 134376 dated May 10, 2019, Bul. No. 9, 2019. (in Ukrainian)

ЗМІСТ

Анотація.....	2
Summary.....	20
Зміст.....	38
Перелік умовних позначень.....	42
ВСТУП.....	44
РОЗДІЛ 1	
СХЕМИ АВТОМАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ.....	55
1.1. Аналіз схем імпульсних ПД-регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії.....	57
1.1.1. Імпульсний ПД-регулятор з подвійним диференціюванням.....	59
1.1.2. ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ.....	63
1.1.3. ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем.....	65
1.1.4. ПІ-регулятор з генератором імпульсів.....	67
1.2. Аналіз схем імпульсних регуляторів з ШІМ для керування тепловими об'єктами.....	69
1.3. Огляд існуючих класифікацій схем автоматичних регуляторів.....	72
1.4. Розроблення нової класифікації схем автоматичних регуляторів.....	74
Висновки до розділу 1.....	83
РОЗДІЛ 2	
ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІМПУЛЬСНИХ РЕГУЛЯТОРІВ.....	84
2.1. Показники точності роботи імпульсних регуляторів та обмеження щодо їх застосування.....	84
2.2. Дослідження динамічних характеристик імпульсних ПД-регуляторів.....	86
2.2.1. Імпульсний ПД-регулятор з подвійним диференціюванням.....	92
2.2.2. ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ.....	99
2.2.3. ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем.....	105
2.2.4. ПІ-регулятор з генератором імпульсів.....	111

2.3. Удосконалення алгоритму автоматичного регулятора з широтно-імпульсним модулятором.....	121
2.3.1. Способи керування тепловими об'єктами.....	123
2.3.2. Удосконалений алгоритм автоматичного регулятора з ШІМ.....	126
2.3.3. Вибір періоду імпульсів ШІМ для керування тепловим об'єктом...	131
2.4. Методика розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу на вході автоматичного регулятора.....	133
2.4.1. Особливості фільтрів аналогових сигналів.....	134
2.4.2. Експериментальне дослідження сигналів на вході автоматичного регулятора.....	137
2.4.3. Методика розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу....	138
Висновки до розділу 2.....	147

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ

ІМПУЛЬСНИХ РЕГУЛЯТОРІВ.....	149
3.1. Дослідження нелінійного теплового об'єкта регулювання.....	150
3.1.1. Експериментальне дослідження теплового об'єкта.....	150
3.1.2. Побудова математичної моделі теплового об'єкта.....	155
3.1.3. Реалізація та дослідження моделі теплового об'єкта за допомогою програмованого логічного контролера.....	167
3.2. Дослідження кульового барабанного млина як об'єкта регулювання.....	169
3.2.1. Аналіз параметрів вібрації млина, які визначають характеристики процесу розмелювання.....	170
3.2.2. Експериментальне дослідження перехідних процесів у млині.....	171
3.2.3. Розробка математичної моделі кульового барабанного млина.....	173
3.3. Дослідження теплогенеруючих об'єктів та аналіз ефективності їх роботи..	182
3.3.1. Дослідження точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.....	184

3.3.2. Похибка обліку, зумовлена імпульсним режимом протікання газу.....	187
3.3.3. Похибки обліку, зумовлені теплообміном на вимірювальній ділянці трубопроводу.....	192
Висновки до розділу 3.....	216

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ В ТЕПЛОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ.....

4.1. Розрахунок параметрів налаштування регулятора для керування тепловим об'єктом.....	219
4.1.1. Інженерний метод визначення параметрів ПІД-регулятора.....	220
4.1.2. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора методом розширених частотних характеристик.....	225
4.2. Розробка алгоритму управління роботою кульового барабанного млина для оптимізації його завантаження.....	229
4.2.1. Обґрунтування необхідності розробки нового алгоритму керування завантаженням кульового барабанного млина.....	241
4.2.2. Алгоритм управління млином.....	243
4.2.3. Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора.....	245
Висновки до розділу 4.....	247

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....

5.1. Система автоматичного регулювання з нелінійним тепловим об'єктом.....	249
5.1.1. САР на базі аналогового ПІД-регулятора.....	250
5.1.2. САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням.....	254

5.1.3. САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та ШПМ.....	263
5.1.4. САР на базі ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем.....	272
5.1.5. САР на базі П-регулятора з генератором імпульсів.....	280
5.2. Моделювання та аналіз перехідних процесів у системі автоматичного регулювання завантаженості кульового барабанного млина.....	291
5.3. Моделювання похибок автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.....	295
5.4. Розробка заходів для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.....	300
Висновки до розділу 5.....	303
ВИСНОВКИ	304
Перелік літературних джерел.....	310
ДОДАТОК А	
А1. Опис системи керування завантаженістю кульових барабанних млинів.....	343
А2. Акти впровадження.....	359
ДОДАТОК Б	
Список опублікованих праць за темою дисертації.....	362

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Абревіатури

АР – автоматичний регулятор;

АСК – автоматизована система керування;

АСКТП – автоматизована система керування технологічним процесом;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

БУ – блок управління;

ВМ – виконавчий механізм;

ВП – вимірювальний перетворювач;

ЖСВ – живильник сирого вугілля;

З – задавач;

КБМ – кульовий барабанний млин;

ЛГ – лічильник газу;

ОР – об'єкт регулювання;

П – підсилювач;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

ПЛ – проміжна ланка;

ПЛК – програмовано-логічний контролер;

РО – регулюючий орган;

САР – система автоматичного регулювання;

ТЕС – теплова електрична станція;

ШІМ – широтно-імпульсний модулятор;

Умовні позначення

A – амплітуда;

a, b – сталі часу;

c_p – питома теплоємність;

D – діаметр;

F – витрата;

f – частота;

K – коефіцієнта теплопередачі;
 k – коефіцієнт передачі;
 L – завантаженість кульового барабанного млина;
 l – довжина;
 m – маса;
 Nu – число Нусельта;
 r – радіус;
 Pr – число Прандтля;
 p – тиск;
 Q – кількість тепла;
 Re – число Рейнольдса;
 S – площа;
 s – оператор Лапласа;
 t – час;
 T – температура;
 V – об'єм;
 v – швидкість;
 W – функція передачі;
 x – регульований параметр;
 x_{30} – задане значення регульованого параметра;
 y – регулююча дія;
 z – збурення;
 Δ – абсолютна похибка;
 δ – відносна похибка;
 ε – розузгодження;
 φ – перерегулювання;
 μ – положення виконавчого механізму;
 ρ – густина;
 σ – середньоквадратичне відхилення;
 ψ – коефіцієнт зникання коливань.

ВСТУП

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 [1]-[3]. 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.

Актуальність теми. 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 умови наявності точного обліку енергоносіїв [4]-[6].

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»:

- “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 завантаження);
- “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 методичку 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 визначати 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 нелійними 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 профільтрованого 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: [7],[8] – огляд існуючих класифікацій автоматичних регуляторів та розробка нової класифікації схем автоматичних регуляторів; [9],[10] – аналіз схем імпульсних регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії та моделювання їх динамічних характеристик; [11]-[14] – експериментальні дослідження перехідних процесів нелінійного теплового об'єкта керування та розробка його математичної моделі;

[15]-[17] – 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; [18],[19] – розробка методики розрахунку оптимального фільтра аналогового вхідного сигналу автоматичного регулятора; [20]-[32] – розробка математичної моделі кульового барабанного млина та алгоритму управління роботою млина для оптимізації його завантаження; [33]-[59] – 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; [60]-[73] – розробка методики визначення та усунення додаткових похибок вимірювання витрати природного газу на ділянках зі змінними параметрами потоку; [74]-[83] – розробка математичної моделі похибки вимірювання об’єму газу, зумовленої інерційністю термоперетворювача; [84]-[99] – дослідження теплообмінних процесів у системах обліку природного газу, розробка математичної моделі теплообміну між потоком газу та корпусом роторного лічильника газу.

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. Ополь, Польща, 2012 р., 2018 р.
- 8-ий міжнародний симпозіум 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.

РОЗДІЛ 1

СХЕМИ АВТОМАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ТА ЇХ КЛАСИФІКАЦІЯ

Керування технологічними процесами та об'єктами є головною сферою застосування засобів регулювання, які можуть бути виконані у формі окремих регулюючих приладів або програмних регуляторів, реалізованих за допомогою мікропроцесорних програмовано-логічних контролерів (ПЛК). Техніка автоматичного регулювання є найважливішою складовою традиційної системи автоматичного керування й автоматизації, а регулювання – це дії, спрямовані на підтримку заданого значення керованої величини [100]-[103].

В теперішній час для керування технологічними процесами все ширше застосовують автоматизовані системи керування (АСК) – людино-машинні системи, які забезпечують автоматичний збір та обробку інформації, що є необхідним для оптимізації керування. При цьому під процесом оптимізації розуміють вибір такого варіанту керування, при якому досягається екстремальне значення критерію керування [104]-[107].

Автоматизація залишається одним з головних завдань промислового виробництва і соціальної сфери в різні періоди економічного розвитку сучасного суспільства. З часом автоматизація стала все більш широким поняттям, включаючи в себе деякі нові завдання свого наукового і технічного розвитку: комп'ютеризацію, роботизацію та інші спеціальні галузі науки. Однак зміст і основне її призначення залишається незмінним – полегшення або повна заміна важкої фізичної та розумової праці людини засобами автоматизації.

Не існує галузі промисловості, в якій не було б потреби застосування автоматизованої системи керування технологічним процесом (АСКТП). Однією із основних переваг АСКТП є зниження (аж до повного виключення) впливу так званого людського фактору на процес, перерозподіл персоналу, мінімізація витрати сировини, покращення якості вихідного продукту і суттєве підвищення ефективності виробництва. Основними функціями таких систем є контроль і керування, обмін даними, обробка, накопичення і зберігання інформації,

формування сигналізації, автоматичного захисту, блокування, побудова графіків та звітів.

Застосування цифрової обчислювальної техніки дозволяє запрограмувати практично будь-який алгоритм керування, і забезпечити більш високу точність його виконання, ніж це можливо при використанні аналогової техніки. Кожне ускладнення алгоритму в цифровій техніці практично не впливає на надійність контуру регулювання. У випадку аналогової техніки, збільшення кількості аналогових блоків суттєво зменшує надійність функціонування контуру.

Інженери з автоматизації часто зустрічаються з проблемою вибору апаратних засобів для вирішення поставлених завдань. На даний час з'явився доступ до якісних закордонних апаратно-програмних засобів: у багатьох технічних журналах, каталогах і в Інтернеті рекламуються промислові контролери відомих фірм [282]-[297]. Але їх застосування в системах автоматизації потребує адаптації до конкретного технологічного процесу.

Крім вибору технічних засобів перед інженерами стоїть не менш важливе завдання – вибір структури автоматичного регулятора та визначення числових значень його параметрів налаштування для керування певним технологічним об'єктом. І це завдання може бути вирішене на основі рекомендацій, наведених у спеціалізованій літературі та технічній документації. Для спрощення вирішення цього завдання розроблено класифікації автоматичних регуляторів.

Метою цього розділу роботи є дослідження та аналіз схем імпульсних ПД-регуляторів, а також розроблення класифікації схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання.

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.

У цьому розділі виконано огляд існуючих схем імпульсних ПД-регуляторів та проаналізовано конфігурації цих схем і параметри їх налаштування. Запропоновано нову класифікацію схем автоматичних регуляторів.

1.1. Аналіз схем імпульсних ПД-регуляторів, що працюють сумісно з виконавчими механізмами інтегруючої дії

Система автоматичного регулювання (САР), як правило, складається з об'єкта регулювання та автоматичного регулятора, які охоплені від'ємним зворотним зв'язком. Спрощена структурна схема САР зображена на рис.1.1 і саме така схема приймається за основу при розрахунку параметрів налаштування ПД регулятора [108]-[110]. Проте, на практиці у склад САР крім автоматичного регулятора входить ряд інших пристроїв (вимірювальний перетворювач, виконавчий механізм, регулюючий орган та ін., див. рис.1.2), які впливають на процес регулювання. Тому необхідно брати до уваги динамічні та статичні характеристики кожного елемента, що входить у склад САР. Зокрема, вимірювальний перетворювач та регулюючий орган у багатьох випадках можуть наближено бути представлені у вигляді пропорційної ланки, а виконавчий механізм може бути пропорційної дії (пневматичний) або інтегральної дії (електричний з двигуном постійної швидкості обертання). Поведінку електричного виконавчого механізму як інтегральної ланки потрібно враховувати під час реалізації ПД закону регулювання у САР.

На рис.1.1 та рис.1.2 зроблено такі позначення:

ОР – об'єкт регулювання;

АР – автоматичний регулятор;

БУ – блок управління;

ВП – вимірювальний перетворювач;

З – задавач;

П – підсилювач / реверсивний пускач;

ВМ – виконавчий механізм;

РО – регулюючий орган;

x – регульований параметр;

y – регулююча дія;

$x_{зд}$ – задане значення регульованого параметра;

z – збурення;

ε – розузгодження;

μ – положення ВМ.

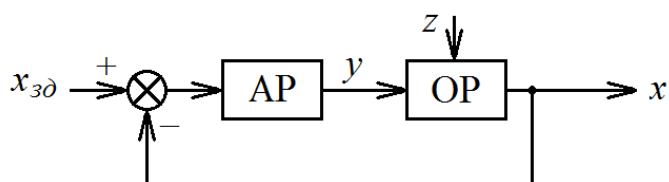


Рис.1.1. Спрощена структурна схема САР.

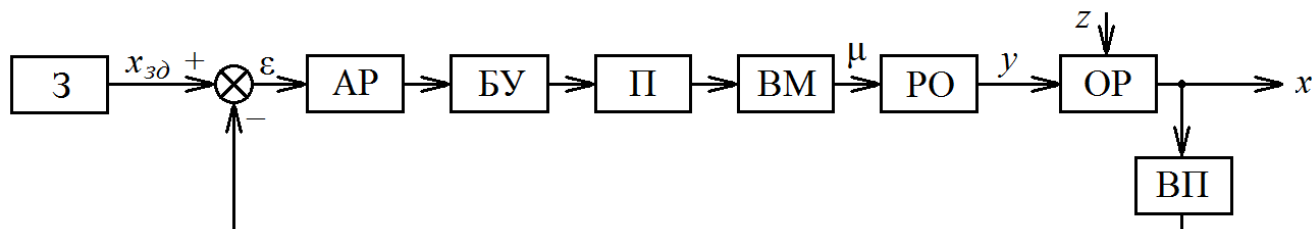


Рис.1.2. Розширена структурна схема САР.

При застосуванні виконавчого механізму пропорційної дії у САР використовують автоматичний регулятор з класичною схемою аналогового ПД-регулювання (паралельної або змішаної структури).

Для керування виконавчим механізмом інтегруючої дії (наприклад, електричний ВМ з двигуном постійної швидкості обертання) застосовують імпульсний ПД-регулятор, який може бути реалізований на базі таких схем:

- схема імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням;

- схема ПІД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором (ШІМ);
- схема ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем.

Ще один варіант схеми імпульсного регулятора передбачає застосування генератора імпульсів і цей варіант покладений в основу функціонального блоку FB42 “CONT_S” програмованих логічних контролерів (ПЛК) SIMATIC S7 фірми Siemens [111]. Ця схема забезпечує регулювання у режимі ПІ-закону і може бути застосована для реалізації імпульсного ПІД-регулювання лише із застосуванням додаткового диференціатора розузгодження.

1.1.1. Імпульсний ПІД-регулятор з подвійним диференціюванням

Імпульсний ПІД-регулятор може бути реалізований за допомогою схеми з подвійним диференціюванням, яка реалізована в електронному регулюючому блоці P27. Цей блок відноситься до комплексу технічних засобів “Каскад-2” [112] і він призначений для роботи з виконавчим механізмом інтегруючої дії, зокрема електричним виконавчим механізмом з постійною швидкістю переміщення. Блок може працювати в режимі ПІ- та ПІД-регулювання.

Відповідно до схеми блоку P27 імпульсний вихідний сигнал формується за допомогою трипозиційного реле, охопленого від’ємним зворотним зв’язком з аперіодичною ланкою першого порядку з коефіцієнтом передачі K_{B33} та сталою часу T_{B33} . Для введення диференціальної складової у закон регулювання, аперіодичну ланку реалізують у вигляді інтегральної ланки, охопленої жорстким від’ємним зворотним зв’язком (див.рис.1.3). На виході інтегральної ланки встановлено суматор, на який поступає продиференційований сигнал розузгодження. У цій схемі сигнал розузгодження проходить подвійне диференціювання: перше диференціювання – через блок реальної диференціальної ланки зі сталою часу T_D , а друге диференціювання – через інтегральну ланку зі сталою часу T_{B33} , яка є у від’ємному зворотному зв’язку відносно продиференційованого сигналу розузгодження.

Схема імпульсного ПД-регулятора, що зображена на рис.1.3, реалізує ПДД'-функцію передачі, а разом з виконавчим механізмом, який є інтегральною ланкою, формується ПД-закон регулювання з такою функцією передачі:

$$W(p) = K_{II} \left(1 + \frac{1}{T_{I3}p} + \frac{T_D p}{T_D p + 1} \right), \quad (1.1)$$

де K_{II} – коефіцієнт пропорційності, T_{I3} – стала часу ізодрому, T_D – стала часу диференціювання, p – оператор Лапласа.

У режимі П-закону регулювання (коли $T_D=0$) схема імпульсного регулятора, що наведена на рис.1.3, реалізує ПД-функцію передачі, а разом з виконавчим механізмом формується П-закон регулювання [9], [121].

Трипозиційне реле у схемі імпульсного регулятора має два основні параметри налаштування – це зона нечутливості ($\Delta_{HЧ}$) та зона неоднозначності (Δ_{HO}). Ширина зони неоднозначності (Δ_{HO}) визначає тривалість імпульсів та пауз між ними (і відповідно частоту імпульсів), що відповідають за інтегральну складову П-закону регулювання. У трипозиційному реле ширина двох зон неоднозначності (одна в додатній області, а друга – у від'ємній) є однаковою, щоб забезпечити однаковий характер зміни положення виконавчого механізму як в додатному напрямі, так і у від'ємному.

Зона нечутливості ($\Delta_{HЧ}$) в імпульсному регуляторі визначає діапазон зміни розузгодження (ϵ), в межах якого не буде спрацьовувати регулятор. З іншого боку цей параметр ($\Delta_{HЧ}$) впливає на кут нахилу перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом. При збільшенні зони нечутливості ($\Delta_{HЧ} > 2 \cdot \Delta_{HO}$), перехідна характеристика імпульсного регулятора стає більш пологою, за рахунок збільшення тривалості пауз між імпульсами.

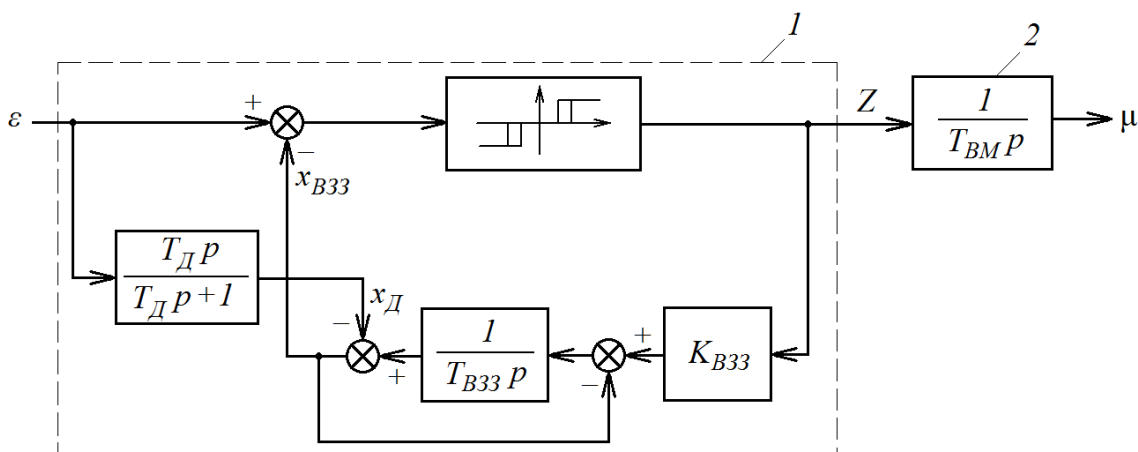


Рис.1.3. Структурна схема імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням (1) та з виконавчим механізмом (2).

Слід зазначити, що в аналогових ПІ- та ПІД-регуляторах попередніх поколінь такий параметр налаштування як “зона нечутливості” відсутній, оскільки в структурі цих регуляторів немає трипозиційного реле [112]. Проте у сучасних цифрових ПІД-регуляторах з аналоговим вихідним сигналом на вході схеми встановлюють нелінійний елемент “зона нечутливості” [113]-[115] для “відсікання” незначних стрибків розузгодження, спричинених роботою аналого-цифрових перетворювачів, а також для усунення впливу перешкод і завад.

В тому випадку, коли відомі значення параметрів налаштування ПІД-закону регулювання та час повного переміщення виконавчого механізму, значення K_{B33} та T_{B33} у схемі на рис.1.3 можуть бути розраховані так [9]:

$$K_{B33} = \frac{T_{I3}}{K_{II} T_{BM}}, \quad (1.2)$$

$$T_{B33} = T_{I3}. \quad (1.3)$$

У режимі ПІ-закону регулювання вихідний сигнал імпульсного регулятора складається з першого довгого імпульсу і ряду коротких імпульсів. За час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм переміститься на величину, що приблизно дорівнює стрибкоподібній зміні вихідного сигналу аналогового

регулятора внаслідок дії пропорційної складової. Тому перший імпульс відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання. Усі наступні імпульси з паузами приводять до ступінчатої зміни положення виконавчого механізму і відповідають дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання [121].

Оскільки імпульсний регулятор призначений для керування електричним виконавчим механізмом, то необхідно враховувати його робочі характеристики. Однією з таких характеристик є мінімальна тривалість імпульсів керування, яка, наприклад, для виконавчого механізму типу МЕО-630/63-0,63-92К, становить 0,28 с [116]. Тому виникає завдання розрахунку мінімальної ширини зони неоднозначності $(\Delta_{HO})_{min}$ для заданої мінімальної тривалості імпульсів $(\Delta t_i)_{min}$. Значення $(\Delta_{HO})_{min}$ для схеми, зображеної на рис.1.3, пропонується розраховувати в такій послідовності:

1. Для заданої мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження розраховують мінімальну тривалість першого імпульсу $(\Delta t_{i1})_{min}$ за формулою:

$$(\Delta t_{i1})_{min} = T_{B33} \cdot \ln \left(\frac{K_{B33}}{K_{B33} - \Delta \varepsilon_{min} / 100} \right). \quad (1.4)$$

2. Для заданої мінімальної тривалості імпульсів $(\Delta t_i)_{min}$ визначають мінімальну тривалість першої паузи $(\Delta t_{n1})_{min}$, шляхом розв'язку наступного нелінійного алгебраїчного рівняння числовим методом:

$$(\Delta t_i)_{min} = T_{B33} \cdot \ln \left(\frac{K_{B33} \cdot \left(e^{\frac{(\Delta t_{i1})_{min}}{T_{B33}}} - 1 - e^{\frac{(\Delta t_{i1})_{min} + (\Delta t_{n1})_{min}}{T_{B33}}} \right)}{\Delta \varepsilon_{min} / 100 - K_{B33}} \right) - (\Delta t_{i1})_{min} - (\Delta t_{n1})_{min}. \quad (1.5)$$

3. Розраховують мінімальну ширину зони неоднозначності $(\Delta_{HO})_{min}$ за формулою:

$$(\Delta_{HO})_{min} = \Delta \varepsilon_{min} - K_{B33} \cdot 100 \cdot \left(e^{\frac{(\Delta t_{i1})_{min}}{T_{B33}}} - 1 \right) \cdot e^{\frac{(\Delta t_{i1})_{min} + (\Delta t_{n1})_{min}}{T_{B33}}}. \quad (1.6)$$

При встановленні в імпульсному регуляторі мінімальної зони неоднозначності $(\Delta_{HO})_{min}$, отриманої за формулою (1.6), тривалість імпульсів не буде меншою за задане значення $(\Delta t_i)_{min}$. При збільшенні зони неоднозначності Δ_{HO} , а також для стрибкоподібних змін розузгодження більших за $\Delta \varepsilon_{min}$, тривалість імпульсів завжди буде більшою за $(\Delta t_i)_{min}$.

Електричний виконавчий механізм крім обмеження щодо мінімальної тривалості імпульсів має ще одне обмеження, а саме обмеження щодо мінімальної тривалості паузи між реверсним увімкненням. Наприклад, для виконавчого механізму типу МЕО-630/63-0,63-92К інтервал часу між вимкненням та увімкненням на зворотний напрям повинен бути не менше 50 мс [116].

Розглянутий принцип роботи імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням може бути реалізований шляхом програмування і у сучасних мікропроцесорних контролерах нового покоління.

1.1.2. ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ

Другий варіант реалізації імпульсного ПД-регулятора для керування виконавчим механізмом інтегруючої дії полягає у застосуванні ПД-регулятора з диференціатором та трипозиційним широтно-імпульсним модулятором (ШІМ). Схема такого регулятора зображена на рис.1.4.

Аналоговий вихідний сигнал ПД-регулятора (Y) проходить через диференціатор і таким чином реалізується ПДД'-функція передачі. Продиференційований вихідний сигнал аналогового ПД-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 ПД-регулятора проходить через такі перетворення – диференціювання (в диференціаторі), пропорційне перетворення (у ШІМ) та

інтегрування (у виконавчому механізмі). Оскільки функція передачі ШІМ відповідає пропорційній ланці з коефіцієнтом 1, то значення коефіцієнта диференціювання у диференціаторі (K_D) встановлюється рівним часу повного переміщення виконавчого механізму ($K_D = T_{BM}$), щоб переміщення виконавчого механізму (μ) було пропорційним до вихідного сигналу аналогового ПІД-регулятора (Y). Значення сталої часу T_1 у диференціаторі встановлюється на багато меншим від часу повного переміщення виконавчого механізму ($T_1 \ll T_{BM}$, наприклад $T_1 = 0,01$ с) для того, щоб диференціатор був максимально наближеним до ідеальної диференціальної ланки.

Налаштування трипозиційного реле у схемі ШІМ впливає на динаміку процесу регулювання, зокрема ширина зони неоднозначності (Δ_{HO}) визначає тривалість імпульсів та пауз між ними. Чим меншою є зона неоднозначності (Δ_{HO}), тим коротшими є імпульси та паузи між ними. А зона нечутливості ($\Delta_{HЧ}$) визначає зміщення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом ($\mu(t)$) відносно перехідної характеристики аналогового регулятора ($Y(t)$).

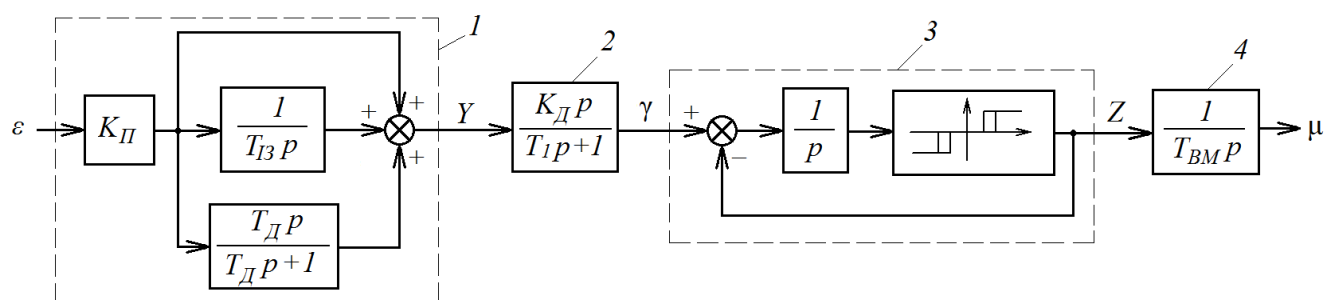


Рис.1.4. Структурна схема ПІД-регулятора (1) з диференціатором (2), трипозиційним широтно-імпульсним модулятором (3) та виконавчим механізмом (4).

Мінімальна ширина зони неоднозначності ШІМ $(\Delta_{HO})_{\min}$ для заданої мінімальної тривалості імпульсів $(\Delta t_i)_{\min}$ може бути розрахована за формулою [9]:

$$(\Delta_{HO})_{\min} = (\Delta t_i)_{\min} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_{\min}}{100}\right), \quad (1.7)$$

де γ_{min} – шпаруватість імпульсів на виході ШІМ при мінімальному збуренні ($\Delta\varepsilon_{min}$).

Значення γ_{min} розраховують за формулою [9]:

$$\gamma_{min} = \frac{K_{II} \cdot \Delta\varepsilon_{min} \cdot 100}{T_{I3}}. \quad (1.8)$$

Розглянутий принцип реалізації імпульсного ПІД регулятора з використанням ШІМ застосований у мікропроцесорному регуляторі ПРОТАР [117] для формування ПІД закону регулювання при керуванні електричним виконавчим механізмом з постійною швидкістю переміщення.

Якщо у схемі на рис.1.4 прийняти $T_1=0$ і виконати деякі структурні перетворення, а саме перенести суматор з виходу диференціатора на його вхід, то отримаємо наближений варіант схеми з ПІД-регулятором та імпульсним перетворювачем, опис якої наведено нижче.

1.1.3. ПІД-регулятор з імпульсним перетворювачем

Імпульсне ПІД-регулювання з електричним виконавчим механізмом може бути реалізоване і за допомогою схеми ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем, яка зображена на рис.1.5. Згідно цієї схеми вихідний сигнал аналогового ПІД-регулятора (Y) поступає на трипозиційне реле, охоплене від'ємним зворотним зв'язком з інтегральною ланкою, що імітує виконавчий механізм. Схема імпульсного перетворювача реалізує операцію диференціювання. Таким чином 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 ПІД регулятора (Y) у положення виконавчого механізму (μ).

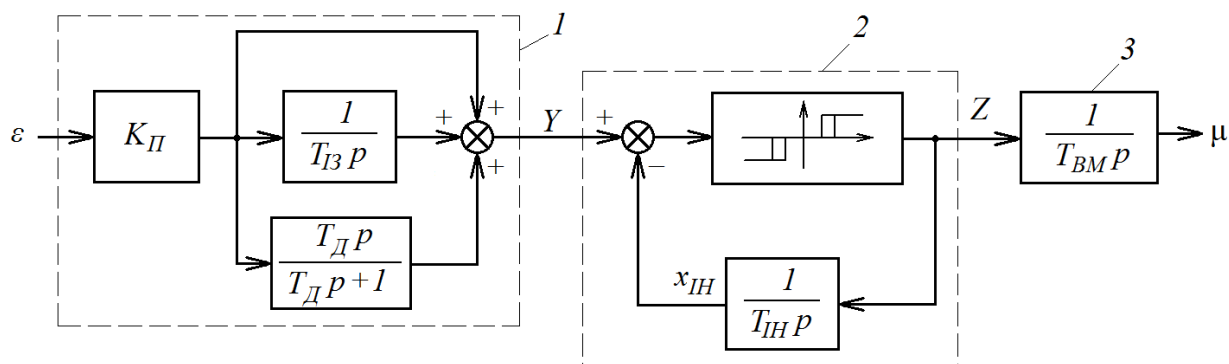


Рис.1.5. Структурна схема ПІД-регулятора (1) з імпульсним перетворювачем (2) та виконавчим механізмом (3).

Оскільки інтегральна ланка у від'ємному зворотному зв'язку імітує виконавчий механізм, то значення її сталої часу встановлюється рівним часу повного переміщення виконавчого механізму ($T_{IH} = T_{BM}$). Тому сигнал на виході інтегральної ланки у від'ємному зворотному зв'язку відтворює положення виконавчого механізму ($x_{IH} = \mu$).

Налаштування трипозиційного реле у схемі імпульсного перетворювача, як і у схемі ШІМ, впливає на динаміку процесу регулювання. Чим меншою є зона неоднозначності (Δ_{HO}), тим коротшими є імпульси та паузи між ними. А зона нечутливості ($\Delta_{HЧ}$) визначає зміщення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом ($\mu(t)$) відносно перехідної характеристики аналогового регулятора ($Y(t)$). В тому випадку, коли $\Delta_{HЧ} > 2 \cdot \Delta_{HO}$, зміщення ($Y(t) - \mu(t)$) є від'ємним (по відношенню до напрямку зміни вихідного сигналу) і його мінімальне поточне значення дорівнює величині $(\Delta_{HЧ}/2 - \Delta_{HO})$. Коли $\Delta_{HЧ} = 2 \cdot \Delta_{HO}$, мінімальне поточне зміщення рівне нулю. При $\Delta_{HЧ} < 2 \cdot \Delta_{HO}$ зміщення є додатним і його максимальне поточне значення дорівнює величині $(\Delta_{HO} - \Delta_{HЧ}/2)$, але таке налаштування ($\Delta_{HЧ} < 2 \cdot \Delta_{HO}$) є небажаним, оскільки схема імпульсного перетворювача стає менш стійкою. В тому випадку, коли $\Delta_{HЧ} = \Delta_{HO}$ трипозиційне реле перетворюється у двопозиційне реле і на виході виникають автоколивання, а сама схема є нестійкою.

Мінімальна ширина зони неоднозначності $(\Delta_{HO})_{min}$ для заданої мінімальної тривалості імпульсів $(\Delta t_i)_{min}$ та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon_{min}$ може бути розрахована за формулою [9]:

$$(\Delta_{HO})_{min} = (\Delta t_i)_{min} \cdot \left(\frac{100}{T_{BM}} - \frac{\Delta\varepsilon_{min} \cdot K_{II}}{T_{I3}} \right). \quad (1.9)$$

Встановлення мінімальної зони неоднозначності $(\Delta_{HO})_{min}$, розрахованої за формулою (1.9), у схемі імпульсного перетворювача забезпечить задану мінімальну тривалість імпульсів $(\Delta t_i)_{min}$, що відповідають за інтегральну складову ПІ-закону регулювання, при поступленні мінімального стрибкоподібного розузгодження $\Delta\varepsilon_{min}$. Для більших значень розузгодження та при збільшеній зоні неоднозначності (Δ_{HO}) тривалість імпульсів завжди буде більшою за $(\Delta t_i)_{min}$.

Розглянута схема ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем (рис.1.5) для керування електричним виконавчим механізмом реалізована у регуляторі SIPART DR20 [118] фірми Siemens.

1.1.4. ПІ-регулятор з генератором імпульсів

Для керування електричним виконавчим механізмом під час автоматичного регулювання у САР може бути застосована і згадана вище схема ПІ-регулятора з генератором імпульсів, що реалізована у функціональному блоці FB42 “CONT_S” програмованих логічних контролерів SIMATIC S7 фірми Siemens [111]. Ця схема зображена на рис.1.6 і вона є модифікованим варіантом схеми аналогового регулятора з імпульсним перетворювачем (рис.1.5).

Між схемами на рис.1.5 і рис.1.6 є такі чотири відмінності:

1. На рис.1.6 відсутній блок диференціювання розузгодження $(T_{дп}/(T_{дп}+1))$, який є на рис.1.5.

2. На рис.1.5 відсутній блок генератора імпульсів, який є на рис.1.6.

3. Два інтегратори на рис.1.5 ($1/(T_{I3}p)$ і $1/(T_{IH}p)$) об'єднані в один інтегратор ($1/p$) на рис.1.6, а коефіцієнти $1/T_{I3}$ і $1/T_{IH}$ винесені за межі блоку сумування, встановленого перед цим інтегратором.

4. На рис.1.6 після блоку множення на коефіцієнт $1/T_{I3}$ встановлено ключ, який розмикається під час наявності імпульсів на виході схеми.

Структурні перетворення для порівняльного аналізу схем на рис.1.5 та рис.1.6 були виконані відповідно до правил та прикладів, наведених у [119].

В тому випадку, якби у схемі імпульсного ПІ-регулятора з генератором імпульсів (рис.1.6) був відсутнім ключ, то при поступленні стрибкоподібного розузгодження на вхід цієї схеми перехідні процеси на її виході були би ідентичними до перехідних процесів на виході схеми, зображеної на рис.1.5, у режимі ПІ-закону регулювання ($T_D=0$). Ключ у схемі на рис.1.6 відключає інтегральну складову ПІ-закону регулювання під час наявності імпульсів на виході регулятора, що приводить до зміщення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом вниз (точніше у напрямку протилежному відносно зміни вихідного сигналу). Перший імпульс на виході схеми на рис.1.6 забезпечує переміщення виконавчого механізму на величину, що дорівнює стрибкоподібній зміні пропорційної складової ПІ-закону регулювання.

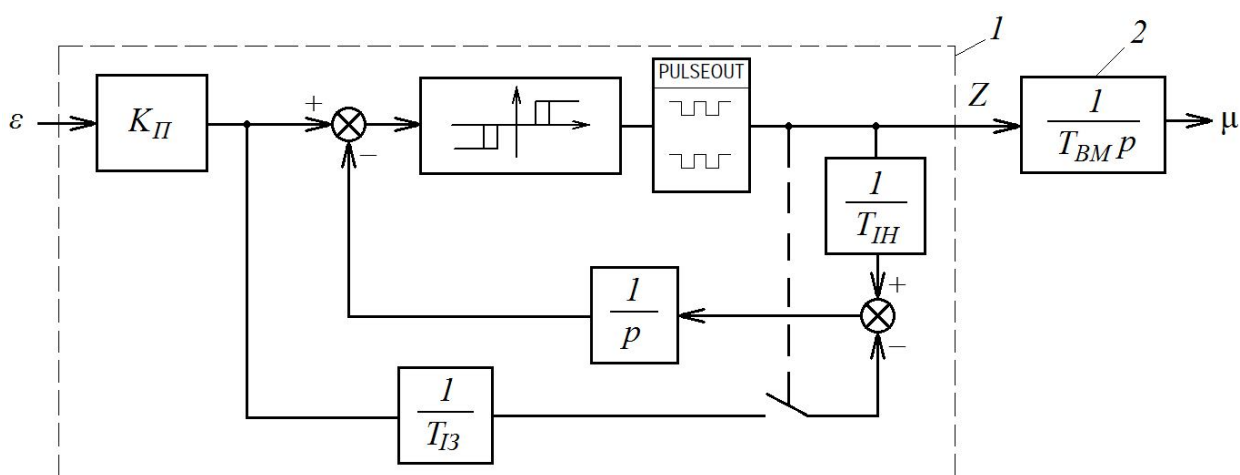


Рис.1.6. Структурна схема ПІ-регулятора з генератором імпульсів (1) та виконавчим механізмом (2).

Стала часу інтегрування (T_{IH}) у схемі на рис.1.6 встановлюється рівною часу повного переміщення виконавчого механізму ($T_{IH}=T_{BM}$), як і в схемі на рис.1.5.

Розрахунок параметрів та налаштування трипозиційного реле у схемі на рис.1.6 здійснюється аналогічно до схеми на рис.1.5.

Генератор імпульсів разом з трипозиційним реле на рис.1.6 відповідають за формування імпульсного вихідного сигналу регулятора відповідно до заданих значень тривалості імпульсів та пауз між ними.

Для реалізації ПД-закону регулювання на базі імпульсного ПІ-регулятора застосовують схемне рішення відповідно до [112], див.рис.1.7.

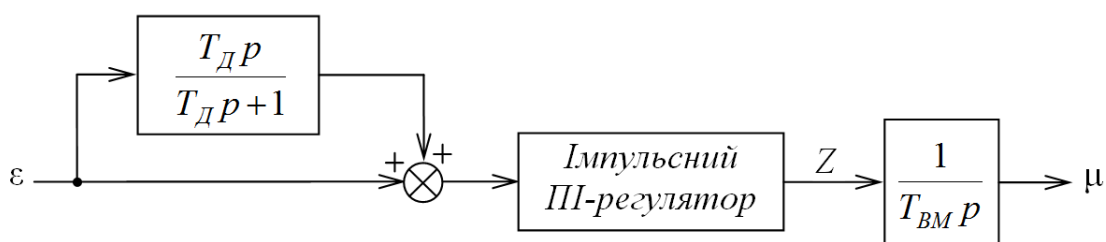


Рис.1.7. Схемне рішення для застосування імпульсного ПІ-регулятора у режимі ПД-закону регулювання.

Схемне рішення, представлене на рис. 1.7, може бути застосоване у ПЛК SIMATIC S7 для реалізації ПД-закону регулювання на базі функціонального блоку FB42 “CONT_S”.

1.2. Аналіз схем імпульсних регуляторів з ШІМ для керування тепловими об'єктами

Для керування тепловими об'єктами часто застосовують позиційний закон регулювання (двопозиційне реле), оскільки автоматичний регулятор із двопозиційним законом є простим у реалізації і надійним у роботі. Такі прилади часто є регуляторами прямої дії [120], [121]. Основним недоліком таких регуляторів є те, що система автоматичного регулювання перебуває у постійному автоколивному процесі. Для усунення автоколивань та підвищення точності регулювання застосовують ПД-регулятор з широтно-імпульсним модулятором. Схеми таких регуляторів представлені на рис.1.8.

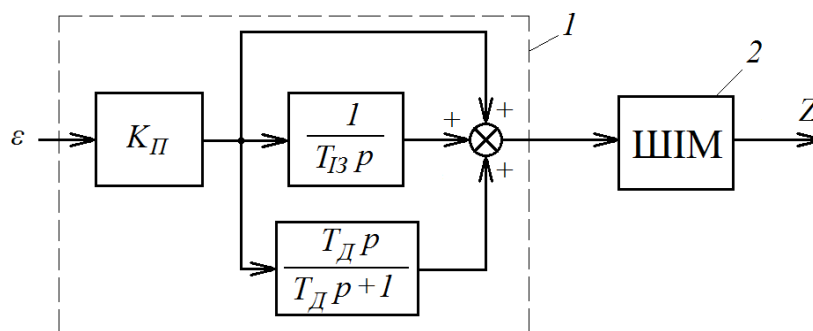


Рис.1.8. Структурна схема ПІД-регулятора (1) з широтно-імпульсним модулятором (2).

Широтно-імпульсний модулятор (ШІМ) – це пристрій або схема, на виході якої формуються імпульси, ширина яких визначається величиною вхідного аналогового сигналу [122]. Основною характеристикою вихідного імпульсного сигналу є шпаруватість (γ) – відношення тривалості імпульсів до їх періоду:

$$\gamma = \frac{W}{\tau} 100\%, \quad (1.10)$$

де W – тривалість імпульсу, τ – період імпульсів.

Один із найбільш поширених методів реалізації ШІМ – застосування генератора пилкоподібних коливань та компаратора. Генератор пилкоподібних коливань реалізується за допомогою інтегратора, який накопичує свій вихідний сигнал за лінійним законом з постійною швидкістю та обнулюється при досягненні максимального значення. Компаратор порівнює вхідний аналоговий сигнал схеми ШІМ із поточним вихідним сигналом інтегратора. Статична характеристика компаратора може бути записана у вигляді

$$\begin{cases} Z = "1" & \text{при } Y < A; \\ Z = "0" & \text{при } Y \geq A, \end{cases} \quad (1.11)$$

де Z – вихідний сигнал ШІМ, A – вхідний сигнал ШІМ, Y – вихідний сигнал інтегратора.

Інший варіант реалізації ШІМ – застосування схеми на базі інтегруючої ланки та релейного елемента, охоплених жорстким від'ємним зворотним зв'язком. Ця схема представлена на рис.1.9.

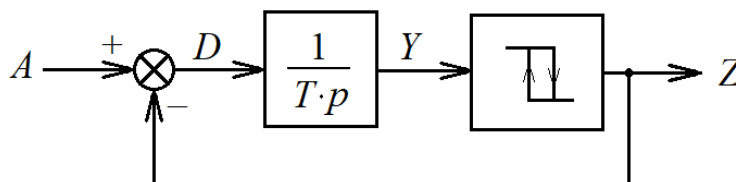


Рис.1.9. Схема ШІМ на базі інтегруючої ланки та релейного елемента.

Налаштувати цю схему можна наступним чином. Статична характеристика двопозиційного реле описується у вигляді

$$\begin{cases} Z = 0 & \text{при } Y < 0; \\ Z = 100 & \text{при } Y \geq \Delta_{HO}, \end{cases} \quad (1.12)$$

де Z – вихідний сигнал ШІМ, Y – вихідний сигнал інтегруючої ланки, Δ_{HO} – ширина зони неоднозначності двопозиційного реле.

Для заданих значень періоду імпульсів (τ), сталої часу інтегруючої ланки (T) та вхідного сигналу схеми (A), ширина зони неоднозначності двопозиційного реле може бути розрахована за формулою

$$\Delta_{HO} = \frac{\tau}{T} \cdot \frac{A}{100} (100 - A). \quad (1.13)$$

Якщо двопозиційне реле прийняти за пропорційну ланку з великим коефіцієнтом підсилення, то функція передачі схеми, зображеної на рис.1.9, може наближено бути представлена у вигляді:

$$W_{ШІМ}(p) = \frac{\frac{1}{T \cdot p} \cdot K_P}{1 + \frac{1}{T \cdot p} \cdot K_P} = \frac{1}{\frac{T \cdot p}{K_P} + 1} \approx 1. \quad (1.14)$$

де p – оператор Лапласа, K_P – коефіцієнт передачі реле ($K_P \gg 1$).

Із виразу (1.14) видно, що ШІМ реалізує функцію пропорційного перетворення з коефіцієнтом 1, тобто шпаруватість імпульсного вихідного сигналу дорівнює величині вхідного аналогового сигналу ($\gamma = A$).

1.3. Огляд існуючих класифікацій схем автоматичних регуляторів

У літературних джерелах та електронних ресурсах наведено декілька класифікацій автоматичних регуляторів [112], [123], [124].

Автоматичні регулятори класифікуються за призначенням, принципом дії, конструктивними особливостями, видом енергії, що використовується та ін. [112].

За видом регульованого параметра автоматичні регулятори поділяються на регулятори температури, тиску, розрідження, витрати, рівня, концентрації речовини й т.д.

За конструктивними ознаками автоматичні регулятори поділяються на апаратні, приладові, агрегатні й модульні (елементні).

Регулятори апаратного типу конструктивно являють собою технічний пристрій, що працює в комплекті з первинним вимірювальним перетворювачем. Апаратні автоматичні регулятори працюють незалежно (паралельно) від засобів вимірювання даного технологічного параметра.

Регулятори приладового типу працюють тільки в комплекті із вторинним вимірювальним приладом. Приладові регулятори не мають безпосереднього зв'язку з первинним вимірювальним перетворювачем.

Автоматичні регулятори, побудовані за агрегатним (блоковим) принципом, складаються з окремих уніфікованих блоків, що виконують певні функції. Вхідні й вихідні сигнали цих блоків уніфіковані. Це дозволяє із блоків проектувати автоматичні регулятори різного функціонального призначення.

Автоматичні регулятори, побудовані за модульним (елементним) принципом, складаються з окремих модулів (елементів), що виконують найпростіші операції. Вхідні й вихідні сигнали модулів уніфіковані. Це дозволяє, як і у випадку використання агрегатних регуляторів, збирати автоматичні регулятори різного функціонального призначення.

Залежно від джерела енергії, що використовується автоматичні регулятори поділяються на регулятори прямої й непрямой дії.

У регуляторах прямої дії одночасно з вимірюванням регульованої величини від об'єкта регулювання відбирається частина енергії, що використовується для роботи регулятора і його впливу на виконавчий механізм. Таким чином, до автоматичної системи “об'єкт-регулятор” енергія ззовні не підводиться.

В автоматичних регуляторах непрямой дії для роботи регулятора та його впливу на виконавчий механізм підводять додаткові джерела енергії.

Залежно від виду енергії, що використовується регулятори непрямой дії поділяються на електричні (електромеханічні, електронні), пневматичні, гідравлічні й комбіновані (електропневматичні, електрогідравлічні й т.д.). Вибір регулятора за видом енергії, що використовується визначається за характером об'єкта регулювання та особливостями автоматичної системи.

За характером зміни регулюючого впливу автоматичні регулятори підрозділяються на регулятори з лінійним і нелінійним законами регулювання.

Прикладом регуляторів з нелінійним законом регулювання можуть служити позиційні, зокрема, дво- і трипозиційні регулятори.

Згідно [123], електричні регулятори, що застосовуються в промисловості, прийнято поділяти на два типи:

– приладові, які являють собою вимірювальні прилади з вбудованими електричними регулюючими пристроями для позиційного або пропорційного регулювання;

– апаратні, які являють собою автономні регулюючі прилади, що приймають сигнали безпосередньо від автоматичних давачів і які реалізують заданий закон регулювання й передають на виконавчі механізми отримані керуючі сигнали.

Класифікація автоматичних регуляторів за рядом ознак наведена також у [124]. Ця класифікація схожа до наведеної у [112], проте, у [124] наведено ще таку

ознаку класифікації, як вид регулюючого впливу. За видом регулюючого впливу регулятори поділяються на регулятори безперервної дії та регулятори дискретної дії. Регулятори безперервної дії в процесі регулювання безупинно змінюють вплив на об'єкт. Регулятори дискретної дії змінюють вплив на об'єкт у процесі регулювання або в певні моменти часу, або при досягненні регульованим параметром певних значень. Найпростішим і найпоширенішим типом регуляторів дискретної дії є позиційні регулятори.

Найбільш істотною ознакою для класифікації регуляторів є їхня характеристика, тобто функціональна залежність між переміщенням регулюючого органу й відхиленням регульованого параметра. Як і будь-який інший елемент системи автоматичного регулювання, регулятор може мати лінійну й нелінійну характеристику.

За видом характеристики лінійні регулятори поділяються на І-регулятори (астатичні), ІІ-регулятори (статичні), ІІІ-регулятори (ізодромні), а також регулятори з диференціюванням: ІІД-регулятори й ІІІД-регулятори.

1.4. Розроблення нової класифікації схем автоматичних регуляторів

Виконаний огляд класифікацій автоматичних регуляторів показав, 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, 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, проміжної ланки та об'єкта регулювання (див. рис.1.10).



Рис.1.10. Структурна схема каналу регулювання.

На рис.1.10 зроблено такі позначення: АР – автоматичний регулятор, ПЛ – проміжна ланка, ОР – об'єкт регулювання, Y – вихідний сигнал автоматичного регулятора, X – вхідний сигнал об'єкта регулювання (керуючий вплив на об'єкт 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.

Закон регулювання, який реалізований у автоматичному регуляторі, може бути двох типів: неперервний або позиційний. До неперервного закону регулювання належить ПД-закон з його усіма підвидами (П, І, ПІ, ПД, ІД). До позиційного закону відноситься двопозиційний та трипозиційний закон регулювання.

Вихідний сигнал автоматичного регулятора може бути двох типів: аналоговий або імпульсний. Керуючий вплив на об'єкт регулювання (вхідний сигнал об'єкта регулювання) також може бути аналоговим або імпульсним.

Розроблена класифікація схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання представлена на рис.1.11. Введено умовну нумерацію схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання від 1 до 8.

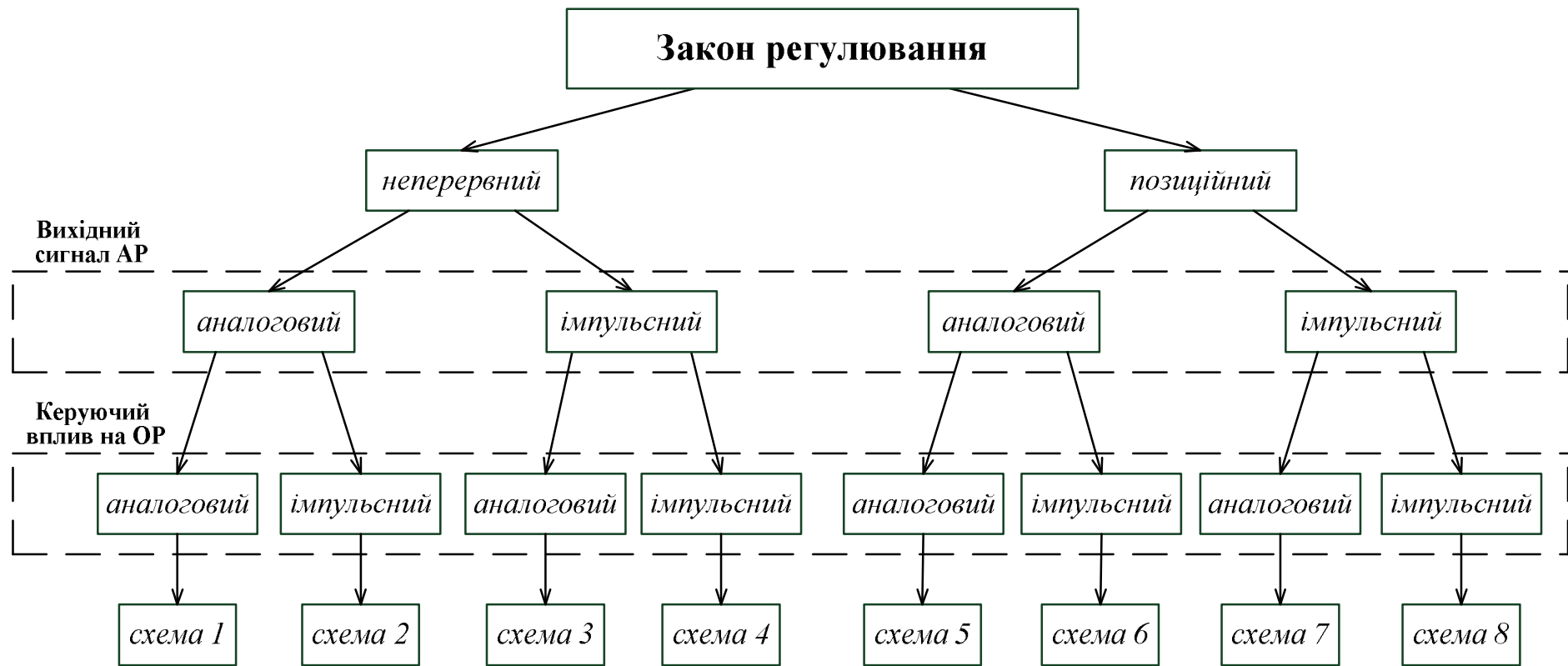


Рис.1.11. Розроблена класифікація схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання.

Особливістю розробленої класифікації є те, що ознаки класифікації розміщено в ієрархічному порядку (див. рис.1.11). Розглядаються різні типи керуючого впливу на об'єкт регулювання для різних типів вихідного сигналу автоматичного регулятора. І різні типи вихідного сигналу автоматичного регулятора розглядаються для різних типів закону регулювання. У розробленій класифікації розглянуто усі можливі комбінації між типами закону регулювання, типами вихідного сигналу регулятора та типами керуючого впливу на об'єкт регулювання із врахуванням ієрархії ознак класифікації.

Схеми автоматичних регуляторів з каналом регулювання (схеми 1–8) відповідно розробленої класифікації представлені на рис.1.12–1.19. Опис та аналіз цих схем адаптований до теплового об'єкта регулювання (електрична піч), у якому керуючим впливом є електрична потужність на вході печі, а регульованим параметром – температура в печі. Детальний опис цього об'єкта керування наведено у [11].

У схемі 1 (див. рис.1.12) автоматичний регулятор реалізує ПД-закон регулювання з аналоговим вихідним сигналом, який поступає на проміжну ланку, після якої аналоговий сигнал поступає на вхід об'єкта регулювання. Проміжна ланка у цій схемі реалізує пропорційне перетворення (підсилення з коефіцієнтом пропорційності K_{II}). У випадку теплового об'єкта проміжною ланкою є тиристорний підсилювач, який збільшує електричну потужність на вході електричної печі у залежності від величини вихідного аналогового сигналу регулятора.

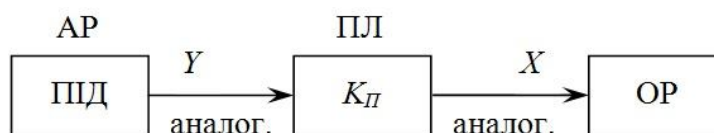


Рис.1.12. Схема 1 згідно розробленої класифікації (аналоговий ПД-регулятор та ВМ пропорційної дії).

У схемі 2 (див. рис.1.13) автоматичний регулятор, як і у схемі 1, реалізує ПД-закон регулювання з аналоговим вихідним сигналом, що поступає на проміжну ланку. Проте, на виході проміжної ланки сигнал є імпульсним. У цій схемі проміжною ланкою є широтно-імпульсний модулятор, вихідний імпульсний сигнал якого є уніполярним і може приймати такі значення: “увімкнено” (“1”), “вимкнено” (“0”). Підсилений імпульсний сигнал після ШІМ поступає на вхід об’єкта регулювання (електрична піч). У якості підсилювача у складі проміжної ланки може бути застосоване реле або тиристорний підсилювач, який працює у режимі реле.

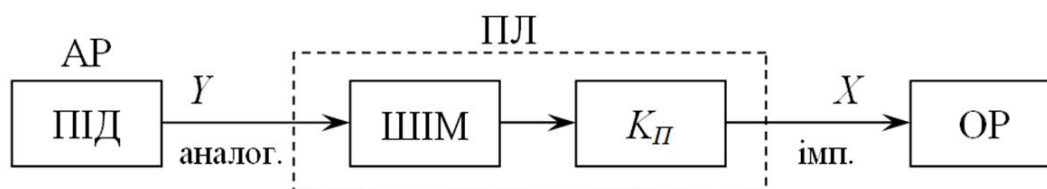


Рис.1.13. Схема 2 згідно розробленої класифікації (аналоговий ПД-регулятор та широтно-імпульсний модулятор з підсилювачем).

У схемі 3 (див. рис.1.14) автоматичний регулятор реалізує ПД-закон регулювання з імпульсним вихідним сигналом, який призначений для керування електричним виконавчим механізмом з постійною швидкістю переміщення.

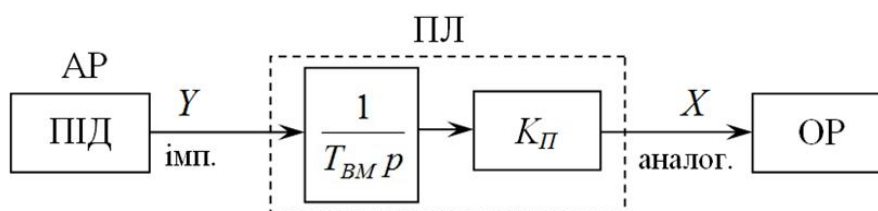


Рис.1.14. Схема 3 згідно розробленої класифікації (імпульсний ПД-регулятор та виконавчий механізм інтегруючої дії з регулюючим органом).

Із врахуванням різних варіантів реалізації схем імпульсних ПІД-регуляторів, які представлені у підрозділі 1.1, їх класифікацію можна представити наступним чином:

Схема 3.1 – Імпульсний ПІД-регулятор з подвійним диференціюванням;

Схема 3.2 – ПІД-регулятор з диференціатором та ШІМ;

Схема 3.3 – ПІД-регулятор з імпульсним перетворювачем;

Схема 3.4 – ПІ-регулятор з генератором імпульсів.

Вихідний сигнал регулятора є біполярним і може приймати такі значення: “більше”, “менше”, “нуль”. Проміжною ланкою у цій схемі є виконавчий механізм, який представлений інтегруючою ланкою, та регулюючий орган, що представлений пропорційною ланкою. Проміжна ланка забезпечує аналогову зміну керуючого впливу на об’єкт регулювання.

У схемі 4 (див. рис.1.15) автоматичний регулятор складається з ПІД-регулятора та широтно-імпульсного модулятора (уніполярного). Імпульсний вихідний сигнал поступає на підсилювач, після якого підсилений імпульсний сигнал поступає на вхід об’єкта регулювання.

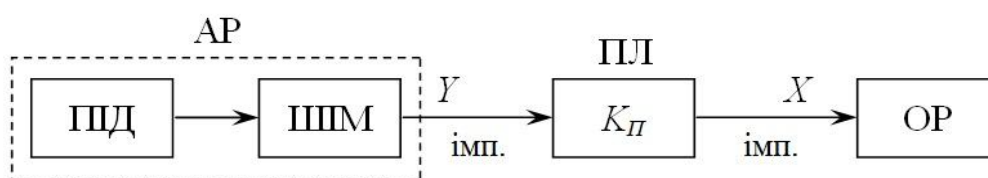


Рис.1.15. Схема 4 згідно розробленої класифікації (ПІД-регулятор з широтно-імпульсним модулятором та підсилювач).

У схемі 5 (див. рис.1.16) автоматичний регулятор складається з трипозиційного реле та інтегратора. Вихідний аналоговий сигнал поступає на підсилювач, після якого підсилений аналоговий сигнал поступає на вхід об’єкта регулювання.

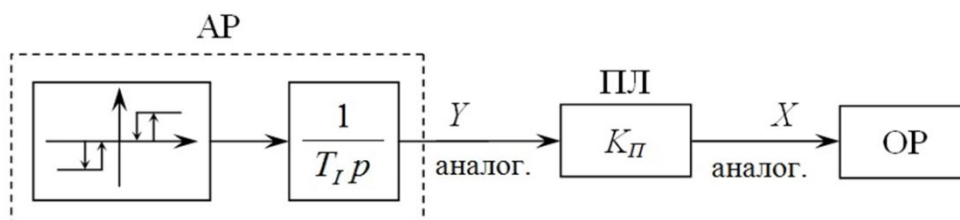


Рис.1.16. Схема 5 згідно розробленої класифікації (позиційний регулятор з інтегратором та підсилювач).

У схемі 6 (див. рис.1.17) автоматичний регулятор, як і у схемі 5, складається з трипозиційного реле та інтегратора. Вихідний аналоговий сигнал поступає на проміжну ланку, що складається з широтно-імпульсного модулятора та підсилювача. Підсилений імпульсний сигнал з виходу проміжної ланки поступає на вхід об'єкта регулювання.

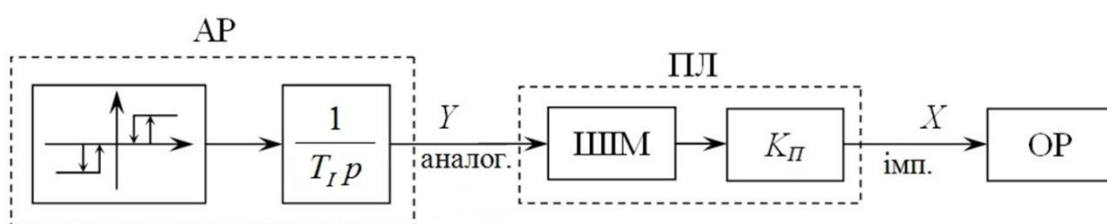


Рис.1.17. Схема 6 згідно розробленої класифікації (позиційний регулятор з інтегратором та широтно-імпульсний модулятор з підсилювачем).

У схемі 7 (див. рис.1.18) автоматичний регулятор реалізує трипозиційний закон регулювання. Вихідний імпульсний сигнал поступає на проміжну ланку, що складається з виконавчого механізму, представленого інтегруючою ланкою, та регулюючого органу, представленого пропорційною ланкою. Проміжна ланка забезпечує аналогову зміну керуючого впливу на об'єкт регулювання.

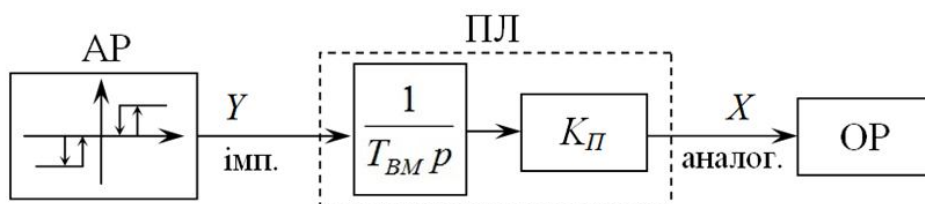


Рис.1.18. Схема 7 згідно розробленої класифікації (позиційний регулятор та виконавчий механізм інтегруючої дії з регулюючим органом).

У схемі 8 (див. рис.1.19) автоматичний регулятор реалізує двопозиційний закон регулювання. Вихідний імпульсний сигнал поступає на підсилювач, після якого підсилений імпульсний сигнал поступає на вхід об'єкта регулювання.

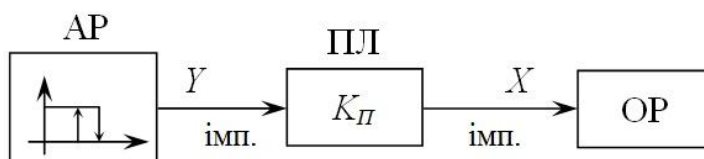


Рис.1.19. Схема 8 згідно розробленої класифікації (позиційний регулятор та підсилювач).

Усі схеми та їх параметри відповідно до розробленої класифікації зведено у таблицю (див. табл.1.1).

Таблиця 1.1

Перелік схем автоматичних регуляторів з каналом регулювання відповідно до розробленої класифікації

№ схеми	Закон регулювання	Вихідний сигнал АР	Керуючий вплив на ОР	Проміжна ланка
1	Неперервний (ПД)	Аналоговий	Аналоговий	Підсилювач ($K_{П}$)
2	Неперервний (ПД)	Аналоговий	Імпульсний	ШІМ (K) + підсилювач ($K_{П}$)
3	Неперервний (ПД)	Імпульсний	Аналоговий	ВМ ($1/(T_{ВМ} \cdot p)$)
4	Неперервний (ПД + ШІМ)	Імпульсний	Імпульсний	Підсилювач ($K_{П}$)
5	Позиційний (3-х позиц. + інт.)	Аналоговий	Аналоговий	Підсилювач ($K_{П}$)
6	Позиційний (3-х позиц. + інт.)	Аналоговий	Імпульсний	ШІМ (K) + підсилювач ($K_{П}$)
7	Позиційний (3-х позиц.)	Імпульсний	Аналоговий	ВМ ($1/(T_{ВМ} \cdot p)$)
8	Позиційний (2-х позиц.)	Імпульсний	Імпульсний	Підсилювач ($K_{П}$)

Схема 8 є найпоширенішим варіантом для керування тепловим об'єктом, оскільки її налаштування та реалізація є простою. Недоліком цієї схеми є постійний авто-коливний процес у системі регулювання. Для усунення автоколивань застосовують ПД-регулятор з широтно-імпульсним модулятором [125], [126], які представлені у схемах 2 та 4. Ці схеми забезпечують кращу якість перехідних процесів та відсутність автоколивань, проте вони є складними у налаштуванні, зокрема в частині вибору числових значень параметрів налаштування ПД-закону регулювання. Це стосується не лише схем 2 і 4, а усіх схем, де є ПД-закон регулювання (схеми 1 – 4). Для вирішення цього завдання виробники ПЛК пропонують алгоритми автоматичного визначення параметрів ПД закону регулювання (PID Autotune) [127], [128]. Суть цього алгоритму зводиться до того, щоб на першому кроці вивести САР на авто-коливний режим, а на другому кроці, на основі параметрів авто-коливного перехідного процесу, встановити числові значення параметрів налаштування ПД-закону регулювання. Тобто, на першому кроці застосовується схема 8, а на другому – схема 1.

Слід зазначити, що схеми 5 та 6 як такі були відсутні. Проте, для заповнення прогалини у правій частині розробленої схеми класифікації (рис.1.11) було запропоновано трипозиційне реле з інтегратором для забезпечення позиційного закону регулювання з аналоговим вихідним сигналом регулятора. Цей варіант (схема 5) у деяких випадках забезпечує кращу якість перехідних процесів у замкнутій САР, ніж аналоговий ПД-регулятор (схема 1). Представлені схеми автоматичних регуляторів можуть бути реалізовані шляхом програмування у ПЛК.

У схемах 2 та 6 проміжна ланка складається з ШІМ та підсилювача. У такий спосіб може бути побудоване «розумне» реле для керування тепловим об'єктом.

У даній роботі значна увага приділена схемі 3 згідно розробленої класифікації. Це є схема імпульсного ПД-регулятора, що працює сумісно з виконавчим механізмом інтегруючої дії. Зокрема виконано моделювання та проаналізовано перехідні процеси для таких підвидів схеми 3: імпульсний ПД-регулятор з подвійним диференціюванням (схема 3.1), аналоговий ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ (схема 3.2), аналоговий ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем (схема 3.3) та імпульсний ПІ-регулятор з генератором імпульсів (схема 3.4).

Висновки до розділу 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 з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем, а також схему П-регулятора з генератором імпульсів. Виконаний аналіз дає можливість визначати основні структурні елементи, параметри налаштування та властивості схем імпульсних регуляторів, що працюють з виконавчими механізмами інтегруючої дії.

Здійснено аналіз існуючих класифікацій автоматичних регуляторів, що застосовуються у промислових системах автоматизації. На основі виконаного аналізу 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. Розглянуто усі можливі комбінації типів керуючого впливу на об'єкт регулювання, вихідного сигналу регулятора та закону регулювання. Запроваджено умовну нумерацію схем від 1 до 8.

Розроблена класифікація дає можливість спростити завдання вибору та аналізу схем автоматичних регуляторів для керування технологічним об'єктом, 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 запропоновано нові схеми елементів контуру регулювання. У даній роботі значна увага приділена схемі 3 згідно розробленої класифікації, а саме схемі імпульсного ПД-регулятора, що працює сумісно з виконавчим механізмом інтегруючої дії.

РОЗДІЛ 2

ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІМПУЛЬСНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Імпульсний регулятор з виконавчим механізмом вносять зміщення (по амплітуді та по фазі) у процес регулювання. Точність роботи імпульсного ПД-регулятора з виконавчим механізмом визначається тим, на скільки їх перехідна характеристика є близькою до перехідної характеристики ідеального аналогового ПД-регулятора [9]. Для дослідження точності роботи імпульсного ПД-регулятора виконано розрахунок параметрів схем імпульсних ПД-регуляторів, описаних у підрозділі 1.1, згідно прийнятих значень параметрів налаштування ПД-регулятора та виконавчого механізму, а також здійснено моделювання динамічних характеристик імпульсних регуляторів з виконавчим механізмом у режимі П- та ПД закону регулювання.

Метою цього розділу є представити результати дослідження точності імпульсних ПД-регуляторів, а також удосконалити алгоритм широтно-імпульсної модуляції в імпульсному ПД-регуляторі для керування тепловим об'єктом та розробити методику розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу на вході автоматичного регулятора.

2.1. Показники точності роботи імпульсних регуляторів та обмеження щодо їх застосування

Для кількісної оцінки точності роботи імпульсного регулятора з виконавчим механізмом пропонується ввести такі три показники (критерії): середнє абсолютне відхилення (Δ), середньоквадратичне відхилення (σ) та середній час запізнення (Δt) перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом відносно перехідної характеристики ідеального аналогового регулятора. Розрахунок цих показників пропонується виконувати шляхом моделювання на основі схем, наведених у підрозділі 1.1. При цьому необхідно розділити розрахунок

цих показників окремо для першого імпульсу та для решти тривалості процесу моделювання перехідних характеристик, оскільки під час першого імпульсу вихідний сигнал ідеального аналогового регулятора змінюється стрибкоподібно, а положення виконавчого механізму змінюється плавно під кутом, що залежить від часу повного переміщення виконавчого механізму. Тому, під час першого імпульсу завжди буде мати місце суттєве відхилення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом від перехідної характеристики аналогового регулятора, а після першого імпульсу це відхилення буде значно меншим і його величина залежить від типу застосованої схеми імпульсного регулятора та від встановлених значень параметрів налаштування схеми.

Розрахунок середнього абсолютного відхилення, середньоквадратичного відхилення та середнього часу запізнення пропонується виконувати так:

$$\Delta = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\mu(t) - Y(t)) dt ; \quad (2.1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (\mu(t) - Y(t))^2 dt} ; \quad (2.2)$$

$$\Delta\tau = \frac{1}{\mu(t_2) - \mu(t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (\mu(t) - Y(t)) dt , \quad (2.3)$$

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

При розрахунку значень показників точності для першого імпульсу, межі інтегрування встановлюються у значення $t_1=0$, $t_2=\Delta t_{i1}$, а для другої ділянки перехідної характеристики після першого імпульсу – $t_1=\Delta t_{i1}$, $t_2=t_{sim}$, де t_{sim} – тривалість моделювання перехідних характеристик.

Необхідно зазначити, що розраховані значення показників точності (Δ , σ , $\Delta\tau$) відповідно до формул (2.1)-(2.3) відображають відхилення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом від перехідної характеристики ідеального аналогового регулятора, які отримані шляхом моделювання. В умовах апаратної реалізації схем імпульсних регуляторів у

конкретних приладах значення цих показників точності можуть бути більшими. Також тут не враховано, що виконавчий механізм на практиці має інерційність та гістерезис, що приводить до додаткового збільшення числових значень цих показників (Δ , σ , $\Delta\tau$).

Для імпульсного ПД-регулятора існують певні обмеження щодо параметрів налаштування схеми регулятора та параметрів виконавчого механізму:

1. Швидкість зміни інтегральної складової ПД закону регулювання не може бути більшою за швидкість зміни положення виконавчого механізму.

2. Час повного переміщення виконавчого механізму повинен бути більшим за тривалість першого імпульсу.

3. При певному співвідношенні між інтегральною та диференціальною складовою ПД закону регулювання для певних значень ширини зони нечутливості ($\Delta_{НЧ}$) та часу повного переміщення виконавчого механізму ($T_{ВМ}$) імпульсний ПД-регулятор може себе поводити як П-регулятор (на виході будуть лише імпульси однієї полярності, а тривалість першої паузи буде дещо довшою відносно інших пауз).

Тому на практиці потрібно ці обмеження враховувати для коректної реалізації імпульсного П- та ПД-регулятора.

2.2. Дослідження динамічних характеристик імпульсних ПД-регуляторів

Для дослідження перехідних характеристик імпульсного регулятора з виконавчим механізмом у режимі П та ПД закону регулювання та їх порівняння з перехідними характеристиками ідеального аналогового регулятора було виконано комп'ютерне моделювання за допомогою числових методів у середовищі Simulink програмного пакету Matlab. Вихідні дані для моделювання: коефіцієнт пропорційності $K_{П} = 2$; стала часу ізодрому $T_{ІЗ} = 120$ с; стала часу диференціювання $T_{Д} = 10$ с; час повного переміщення виконавчого механізму $T_{ВМ} = 63$ с; стрибкоподібна зміна розузгодження $\Delta\varepsilon = 5\%$; мінімальна стрибкоподібна зміна розузгодження $\Delta\varepsilon_{min} = 1\%$; мінімальна тривалість імпульсу керування $(\Delta t_i)_{min} = 0,28$ с.

Числові значення параметрів ПД-закону регулювання вибрані таким чином, щоб забезпечити наглядні графіки змодельованих перехідних процесів.

За допомогою формул (1.2)-(1.6) розраховано параметри схеми імпульсного ПД регулятора з подвійним диференціюванням, зображеної на рис.1.3 (схема 3.1 згідно розробленої класифікації). Отримано такі значення параметрів схеми: $K_{B33}=0,9524$, $T_{B33}=120$, $\Delta_{HO}=0,2201$, $\Delta_{HЧ}=0,6603$. Результати моделювання у режимі ПІ-закону регулювання ($T_D=0$) представлені на рис.2.1, а у режимі ПД-закону регулювання ($T_D=10$) – на рис.2.2.

З рис.2.1 видно, що кути нахилу перехідних характеристик аналогового та імпульсного регулятора з виконавчим механізмом є рівними. Тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить 6,8979 с. За час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=6,8979/63\times 100=10,9490$ (%), що відповідає дії пропорційної складової ПІ закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2,1898\approx K_{PI}$). Дійсне значення сталої часу іздрому (T_{I3}) імпульсного регулятора становить 122,2 с. Тривалість другого імпульсу є рівною 0,8647 с. Значення показників точності під час першого імпульсу: $\Delta_1=-4,8129$ %, $\sigma_1=2,2413$ %, $\Delta\tau_1=3,0600$ с. Значення показників точності у другій частині перехідного процесу: $\Delta_2=-0,2836$ %, $\sigma_2=0,0429$ %, $\Delta\tau_2=3,3368$ с.

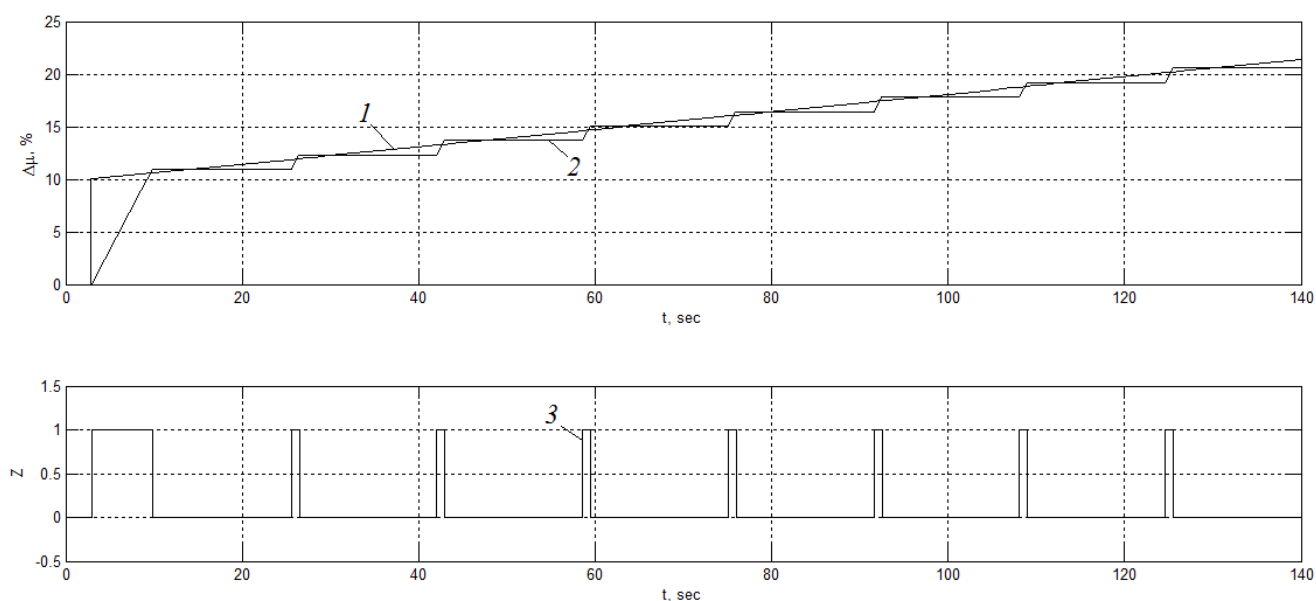


Рис.2.1. Перехідні характеристики ідеального аналогового регулятора (1) та імпульсного регулятора з виконавчим механізмом (2), а також імпульсний вихідний сигнал регулятора (3) у режимі ПІ-закону регулювання, на основі схеми 3.1.

З рис.2.2 видно, що в режимі ПД-закону регулювання на виході імпульсного регулятора є як імпульси “більше”, так і імпульси “менше”. Пауза між першим імпульсом (“більше”) та другим імпульсом (“менше”) становить 0,0652 с. Значення показників точності під час першого імпульсу: $\Delta_1 = -9,5757\%$, $\sigma_1 = 3,6794\%$, $\Delta\tau_1 = 4,6233$ с. Значення показників точності у другій частині перехідного процесу: $\Delta_2 = -0,7968\%$, $\sigma_2 = 0,0796\%$, $\Delta\tau_2 = 9,4432$ с.

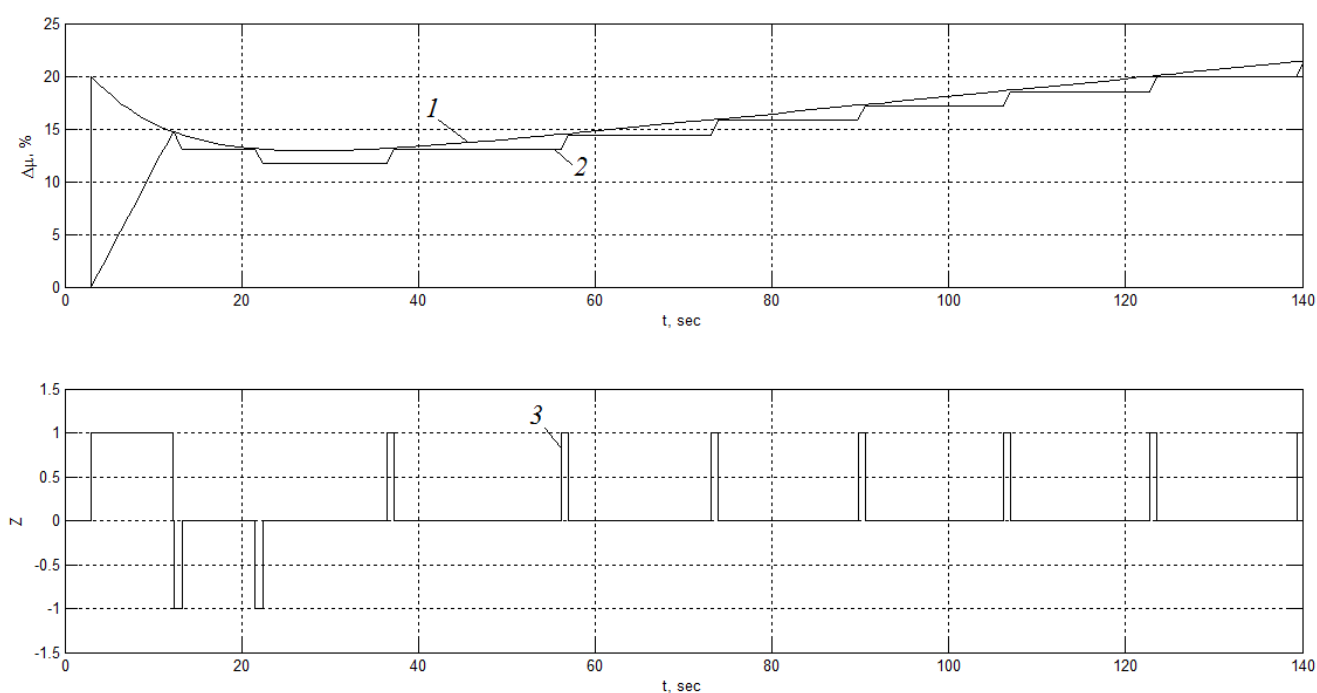


Рис.2.2. Перехідні характеристики ідеального аналогового регулятора (1) та імпульсного регулятора з виконавчим механізмом (2), а також імпульсний вихідний сигнал регулятора (3) у режимі ПД-закону регулювання, на основі схеми 3.1.

Для схеми з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем, зображеної на рис.1.5 (схема 3.3 згідно розробленої класифікації), розраховано мінімальну ширину зони неоднозначності, на основі формули (1.9). Результат розрахунку: $(\Delta_{HO})_{\min} = 0,4398$. Для моделювання встановлено такі значення параметрів схеми: $\Delta_{HO} = 0,8356$, $\Delta_{HЧ} = 1,6712$, $T_{IH} = 63$. Результати моделювання у режимі П-закону регулювання ($T_D = 0$) представлені на рис.2.3, а у режимі ПД-закону регулювання ($T_D = 10$) – на рис.2.4.

З рис.2.3 видно, що кути нахилу перехідних характеристик аналогового та імпульсного регулятора з виконавчим механізмом є рівними. Тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить 6,6491 с. За час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=6,6491/63\times 100=10,5541$ (%), що відповідає дії пропорційної складової ПІ закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2,1108\approx K_{PI}$). Дійсне значення сталої часу іздрому (T_{I3}) імпульсного регулятора становить 122,9 с. Тривалість другого імпульсу є рівною 0,5556 с. Значення показників точності під час першого імпульсу: $\Delta_1=-5,0$ %, $\sigma_1=2,3232$ %, $\Delta\tau_1=3,15$ с. Значення показників точності у другій частині перехідного процесу: $\Delta_2=-0,4107$ %, $\sigma_2=0,0429$ %, $\Delta\tau_2=4,9279$ с.

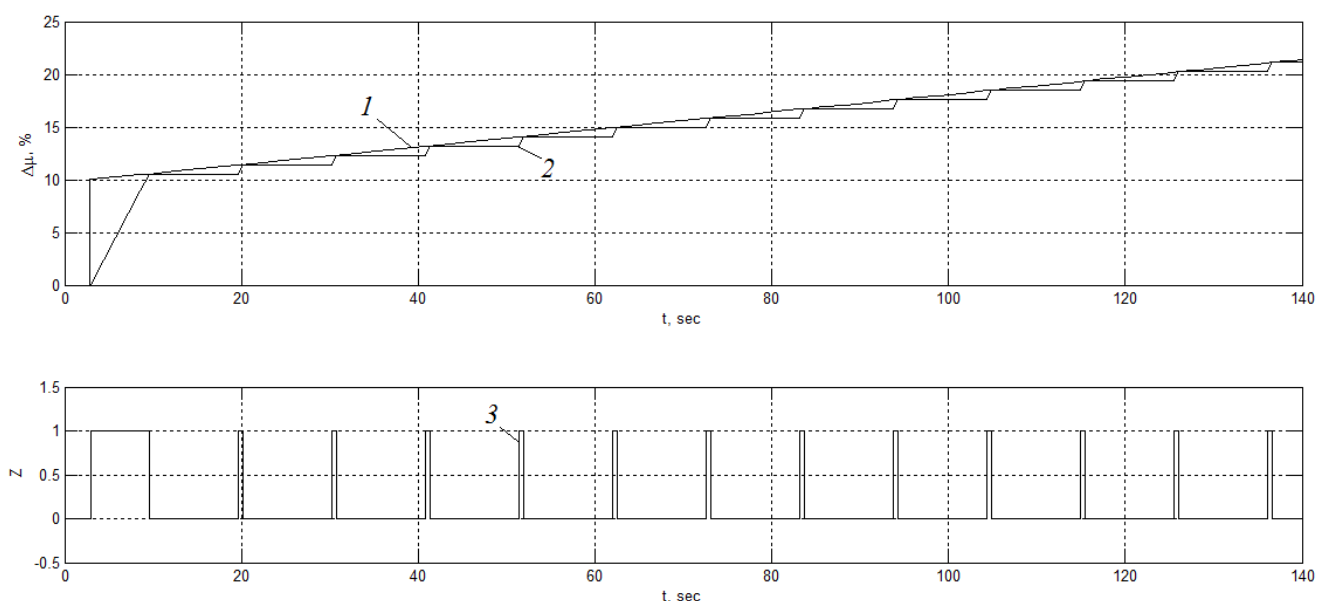


Рис.2.3. Перехідні характеристики ідеального аналогового регулятора (1) та імпульсного регулятора з виконавчим механізмом (2), а також імпульсний вихідний сигнал регулятора (3) у режимі ПІ-закону регулювання, на основі схеми 3.3.

З рис.2.4 видно, що в режимі ПІД закону регулювання на виході імпульсного регулятора є як імпульси “більше”, так і імпульси “менше”. Пауза між першим імпульсом (“більше”) та другим імпульсом (“менше”) становить 3,2960 с. Значення показників точності під час першого імпульсу: $\Delta_1=-9,5432$ %, $\sigma_1=3,6669$ %, $\Delta\tau_1=4,6391$ с. Значення показників точності у другій частині перехідного процесу: $\Delta_2=-0,2895$ %, $\sigma_2=0,0423$ %, $\Delta\tau_2=5,2396$ с.

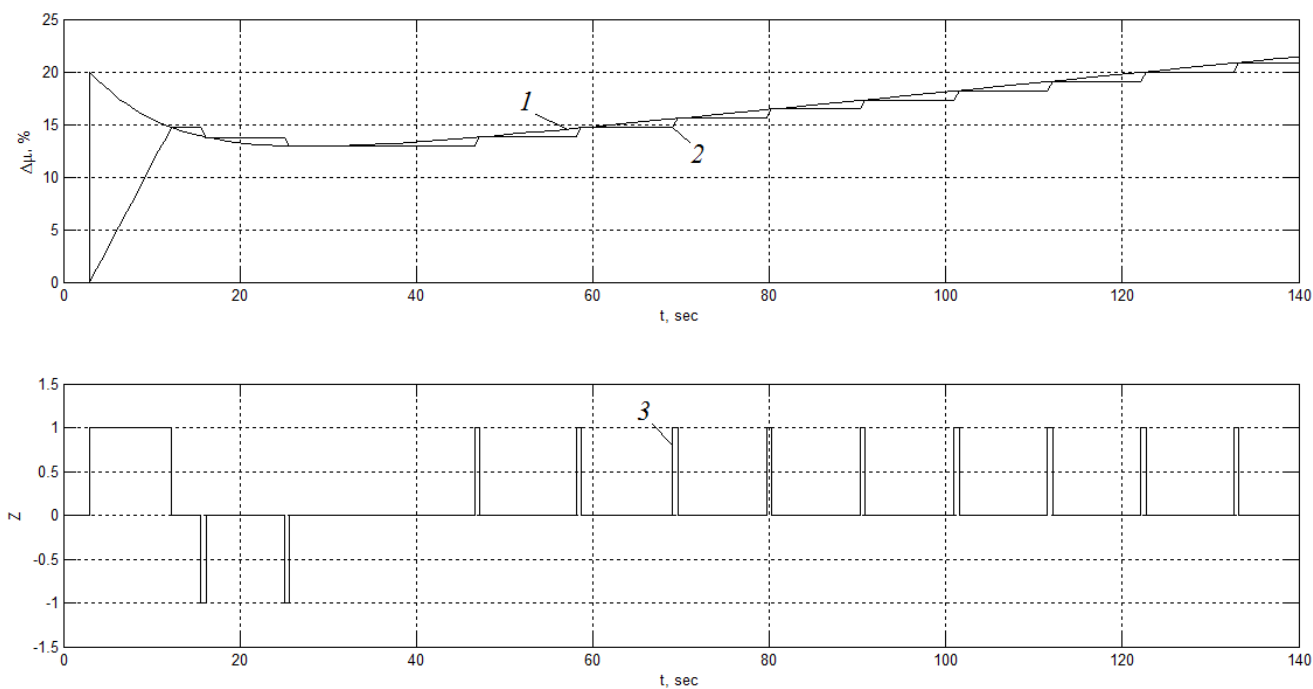


Рис.2.4. Перехідні характеристики ідеального аналогового регулятора (1) та імпульсного регулятора з виконавчим механізмом (2), а також імпульсний вихідний сигнал регулятора (3) у режимі ППД-закону регулювання, на основі схеми 3.3

Результати моделювання перехідної характеристики ПІ-регулятора з генератором імпульсів на основі схеми, зображеної на рис.1.6 (схема 3.4 згідно розробленої класифікації), представлені на рис.2.5. Для моделювання встановлено такі значення параметрів схеми: $\Delta_{HO}=0,8356$, $\Delta_{HЧ}=1,6712$, $T_{IH}=63$. З рис.2.5 видно, що перехідна характеристика імпульсного регулятора з виконавчим механізмом зміщена вниз відносно перехідної характеристики аналогового регулятора і це зміщення з часом зростає, що зумовлене наявністю ключа в схемі регулятора. Тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить 6,3 с. За час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=6,3/63 \times 100=10$ (%), що відповідає дії пропорційної складової ПІ закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2=K_{PI}$). Дійсне значення сталої часу іздрому (T_{I3}) імпульсного регулятора становить 132,9 с. Тривалість другого імпульсу є рівною 0,5265 с. Значення показників точності під час першого імпульсу: $\Delta_1=-5,2625$ %, $\sigma_1=2,4502$ %, $\Delta\tau_1=3,15$ с. Значення показників точності у другій частині перехідного процесу: $\Delta_2=-1,1863$ %, $\sigma_2=0,1070$ %, $\Delta\tau_2=13,2803$ с.

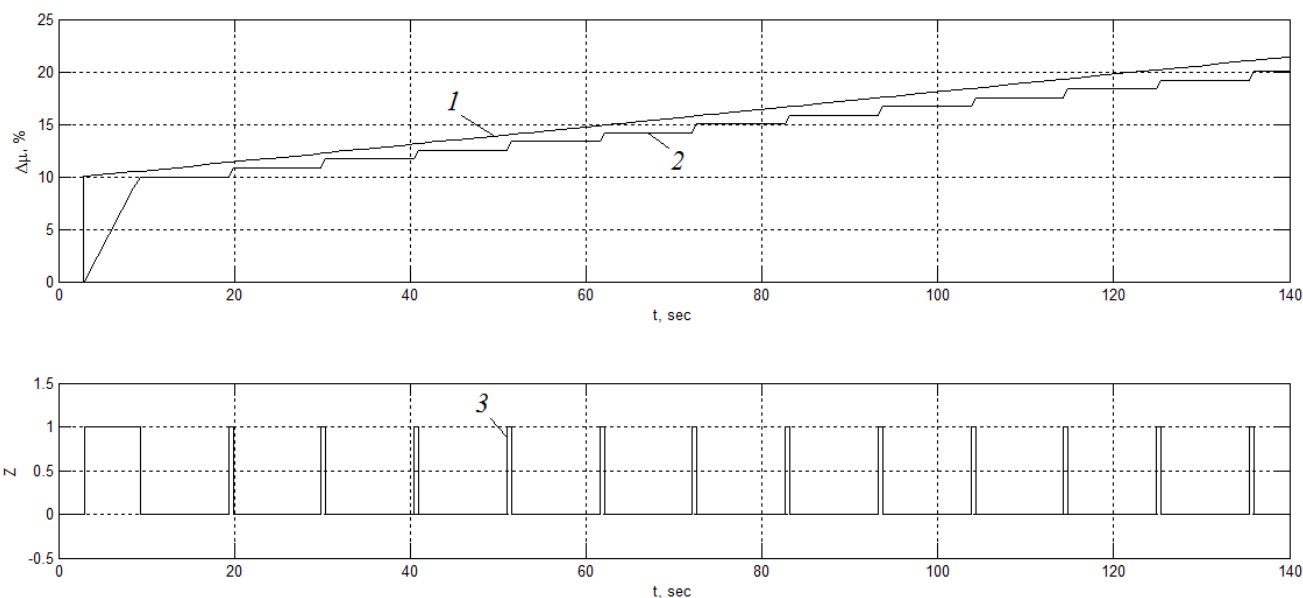


Рис.2.6. Перехідна характеристика ідеального аналогового ПІ-регулятора (1) та імпульсного ПІ регулятора з виконавчим механізмом (2), а також імпульсний вихідний сигнал регулятора (3), на основі схеми 3.4.

З отриманих результатів моделювання видно, що тривалість імпульсів та пауз між ними на рис.2.1 є більшою, порівняно з рис.2.3 та рис.2.5, а їх частота є меншою. Тривалість першої паузи на рис.2.2 є набагато меншою, ніж на рис.2.4, що зумовлене особливістю роботи схеми імпульсного регулятора з подвійним диференціюванням розузгодження у режимі ПІД-закону регулювання.

На основі розрахованих показників точності видно, що у режимі ПІ-закону регулювання найбільше відхилення перехідної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом від перехідної характеристики аналогового регулятора має місце у схемі ПІ-регулятора з генератором імпульсів (схема 3.4 згідно розробленої класифікації). Ця схема вносить середнє запізнення на 13,2803 с для розглянутого прикладу моделювання. У режимі ПІД закону регулювання найбільше відхилення має місце у схемі імпульсного ПІД регулятора з подвійним диференціюванням. Ця схема вносить середнє запізнення на 9,4432 с.

При моделюванні перехідних характеристик аналогового ПІД регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором, на основі схеми,

зображеної на рис.1.4 (схема 3.2 згідно розробленої класифікації), у режимах ПІ- та ПІД-законів регулювання було встановлено, що схема цього регулятора дає схожі перехідні характеристики, як і схема ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем, зображена на рис.1.5 (схема 3.3).

Для більш детального аналізу динамічних характеристик імпульсних ПІД-регуляторів змодельовано їх перехідні характеристики у такій послідовності:

Крок 1. Моделювання в режимі ПІ закону регулювання для мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon_{\min}$.

Крок 2. Збільшення стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon$.

Крок 3. Збільшення зони неоднозначності трипозиційного реле.

Крок 4. Збільшення зони нечутливості трипозиційного реле.

Крок 5. Встановлення зони нечутливості, рівної зоні неоднозначності.

Крок 6. Відключення від'ємної вітки трипозиційного реле.

Крок 7. Моделювання у режимі ПІД закону регулювання.

Результати моделювання представлені на рис.2.7-2.33, де 1 – крива розгону ідеального аналогового ПІД-регулятора, 2 – крива розгону імпульсного ПІД-регулятора з виконавчим механізмом (ламана лінія), 3 – вихідний сигнал імпульсного регулятора.

Для кожного кроку виконано розрахунок показників точності (Δ , σ , $\Delta\tau$) для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу.

2.2.1. Імпульсний ПІД-регулятор з подвійним диференціюванням

За допомогою формул (1.2)-(1.6) розраховано параметри схеми імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням, зображеної на рис.1.3 (схема 3.1 згідно розробленої класифікації). Результати розрахунку: $K_{B33}=0,9524$, $T_{B33}=120$ с, $(\Delta_{HO})_{\min}=0,2201$ %.

Крок 1. Моделювання в режимі ПІ-закону регулювання для мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon_{\min}$. Встановлені значення параметрів: $\Delta\varepsilon=1$ %, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2201$ %, $\Delta_{HF}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.7. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{i1})

становить, 1,2666 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{il})=1,2666/63\times 100=2,01$ (%), що відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{il})/\Delta\varepsilon=2,01\approx K_{II}$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення ≈ 4 %, кут нахилу динамічної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом є меншим за кут нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора, тривалість другого імпульсу є рівною 0,28 с (визначено з графіка $Z(t)$, $34,3774-34,0974=0,28$), сигнал від'ємного зворотного зв'язку (X_{B33}) коливається з амплітудою 0,2201 %, яка рівна $(\Delta_{HO})_{min}$. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=150,5$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,34\%$, $\sigma=0,38\%$, $\Delta\tau=25,84$ с.

Крок 2. Збільшення стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon$. Встановлені значення: $\Delta\varepsilon=5$ %, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2201$ %, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.8. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{il}) становить, 6,4714 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{il})=6,4714/63\times 100=10,27$ (%), що відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{il})/\Delta\varepsilon=2,054\approx K_{II}$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення ≈ 20 %, кут нахилу (діапазон зміни) обох динамічних характеристик збільшився, тривалість імпульсів та їх частота збільшились, тривалість другого імпульсу є рівною 0,2923 с, амплітуда коливань сигналу X_{B33} залишилась рівною 0,2201 % ($(\Delta_{HO})_{min}$), проте ламана експоненційна крива змістилася вгору, порівняно з рис.2.7. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=130,7$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,60$ %, $\sigma=0,62$ %, $\Delta\tau=7,43$ с.

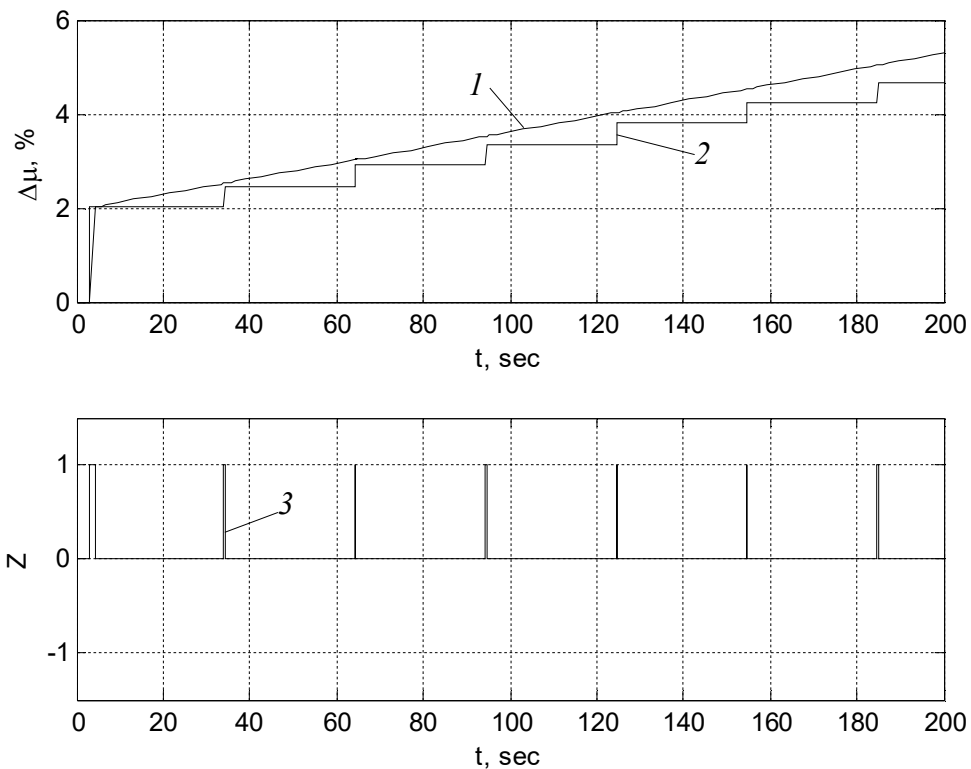


Рис.2.7. Результати моделювання для кроку 1
(ПІ-закон регулювання): $\Delta\varepsilon=1\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

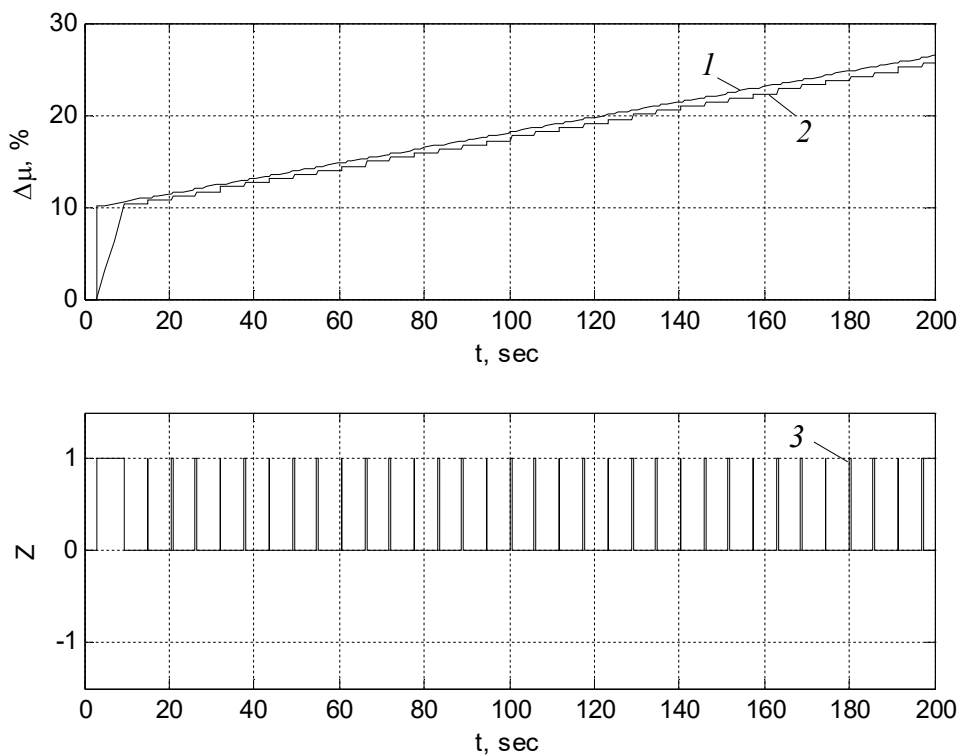


Рис.2.8. Результати моделювання для кроку 2 (збільшено стрибкоподібну зміну розузгодження): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

Крок 3. Збільшення зони неоднозначності. Встановлені значення: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.9. З отриманих результатів видно, що тривалість імпульсів та пауз між ними збільшилась, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1651 с, амплітуда коливань сигналу X_{B33} збільшилась до значення 0,8804 %, що дорівнює $4\cdot(\Delta_{HO})_{min}$.

Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=145,9$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-1,60\%$, $\sigma=1,71\%$, $\Delta\tau=22,44$ с.

Крок 4. Збільшення зони нечутливості. Встановлені значення: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=4\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.10. З отриманих результатів видно, що кут нахилу динамічної характеристики імпульсного регулятора з виконавчим механізмом зменшився, порівняно з рис.2.9, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1539 с, амплітуда коливань сигналу X_{B33} залишилась рівною 0,8804 % ($4\cdot(\Delta_{HO})_{min}$), проте ламана крива змістилася вниз. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=149,6$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-4,34\%$, $\sigma=4,45\%$, $\Delta\tau=76,85$ с.

Крок 5. Встановлення зони нечутливості рівної зоні неоднозначності. Встановлені значення: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.11. З отриманих результатів видно, що у схемі імпульсного регулятора виникли автоколивання, тобто на виході імпульсного регулятора відсутні паузи.

Крок 6. Відключення від'ємної вітки трипозиційного реле у схемі імпульсного регулятора. Встановлені значення: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.12. З отриманих результатів видно, що кути нахилу обох динамічних характеристик є рівними, тривалість імпульсів є дещо більшою, а пауз між ними є дещо меншою, ніж була у кроці 4, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1707 с, амплітуда коливань сигналу X_{B33} як і в кроці 4 є рівною 0,8804 %, проте піднялась ввєрх на значення 0,4402 % ($(\Delta_{HO})/2$).

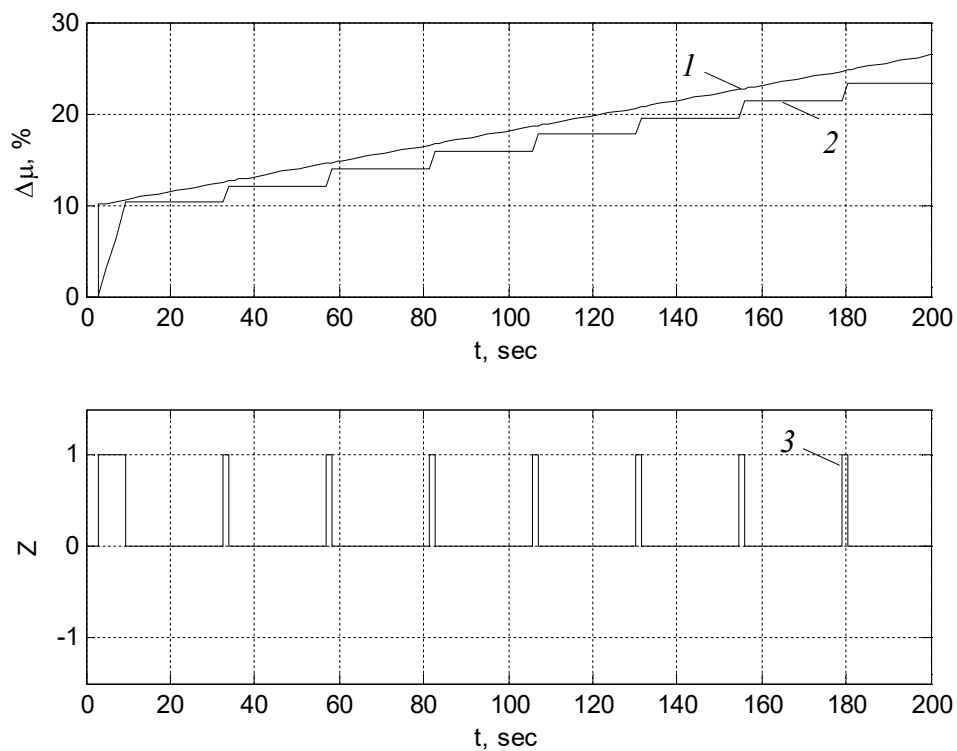


Рис.2.9. Результати моделювання для кроку 3 (збільшено зону неоднозначності):

$$\Delta\varepsilon=5\%, T_D=0\text{ с}, \Delta_{HO}=4\cdot 0,2201\%, \Delta_{HЧ}=2\cdot \Delta_{HO}.$$

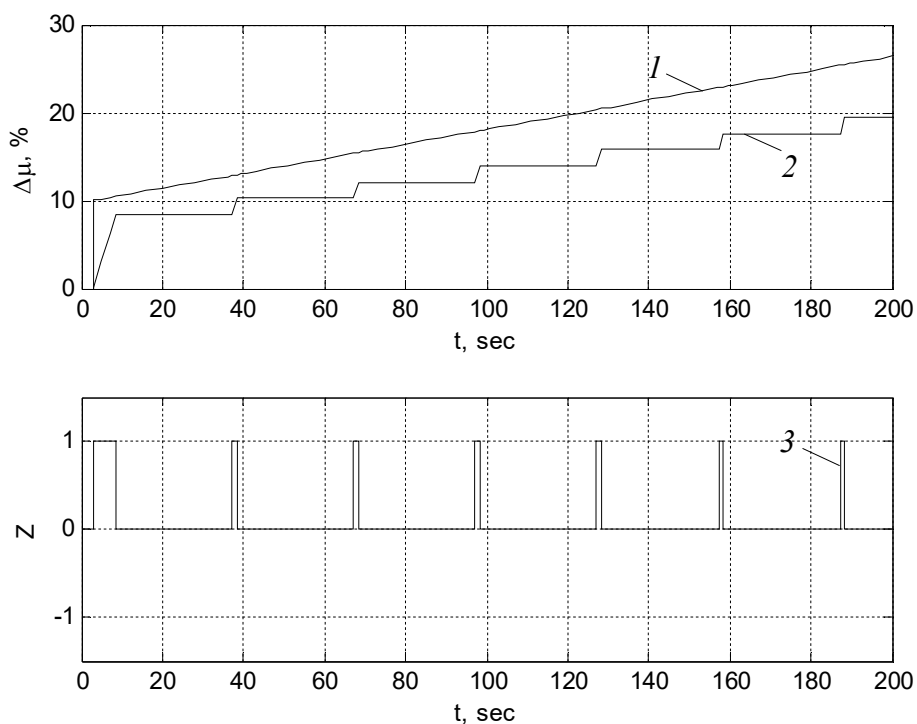


Рис.2.10. Результати моделювання для кроку 4 (збільшено зону нечутливості):

$$\Delta\varepsilon=5\%, T_D=0\text{ с}, \Delta_{HO}=4\cdot 0,2201\%, \Delta_{HЧ}=4\cdot \Delta_{HO}.$$

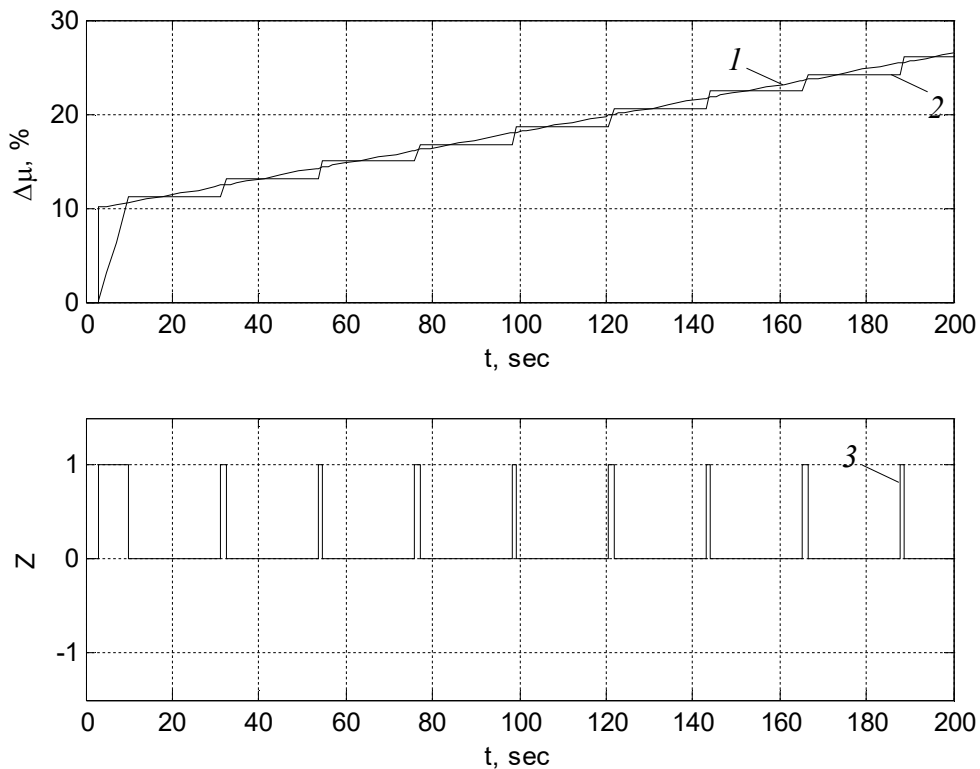


Рис.2.11. Результати моделювання для кроку 5 (зона нечутливості рівна зоні неоднозначності): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

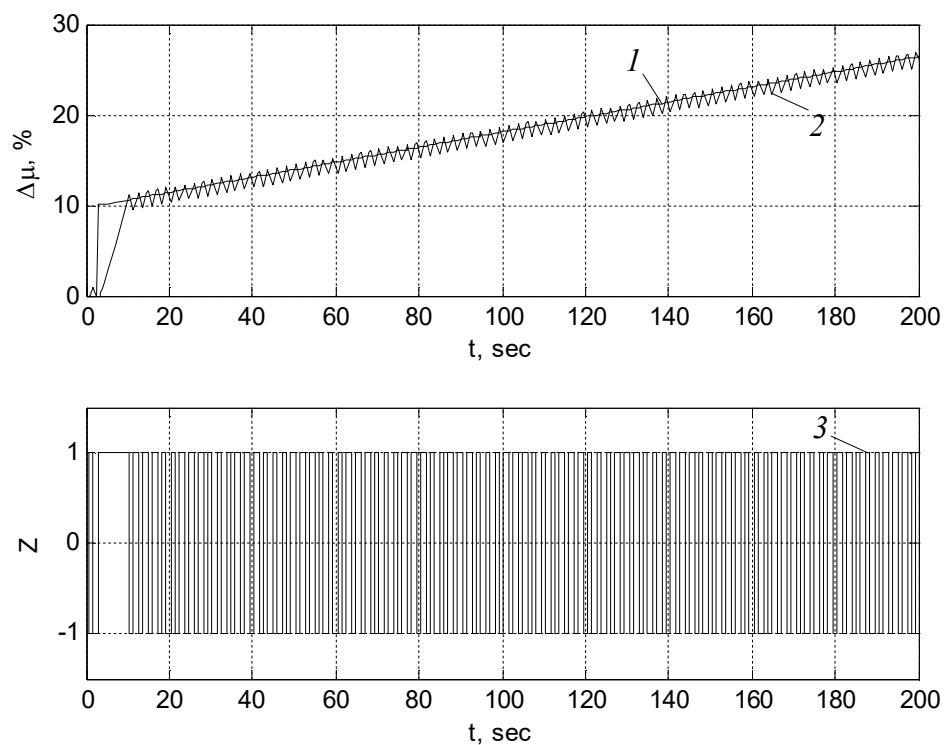


Рис.2.12. Результати моделювання для кроку 6 (відключено від'ємну вітку трипозиційного реле): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

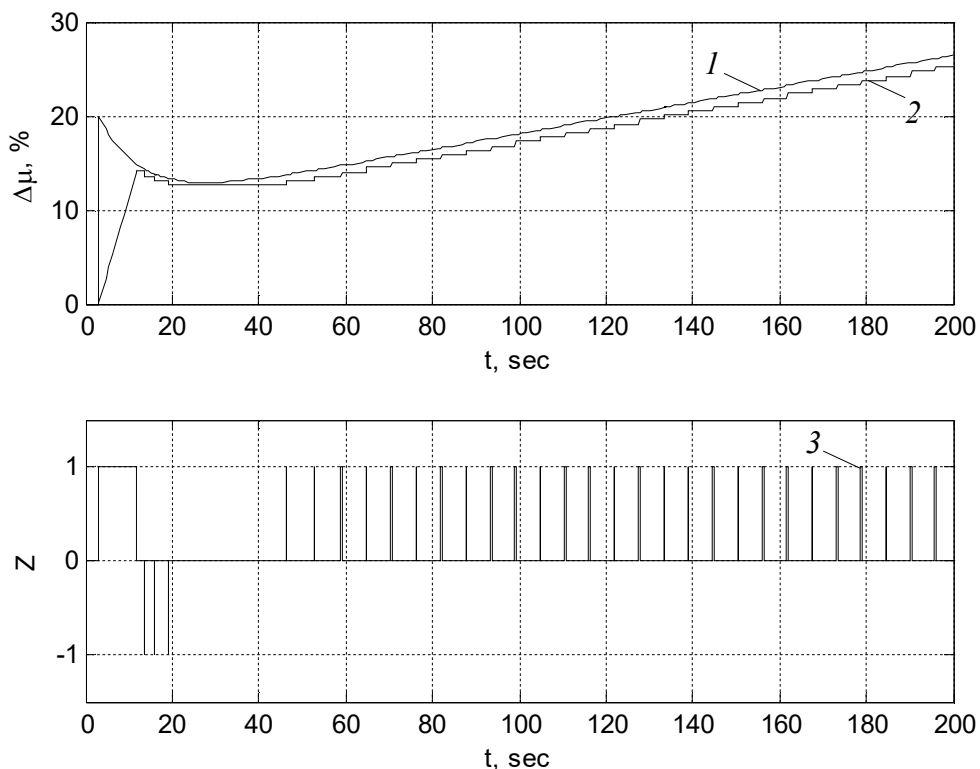


Рис.2.13. Результати моделювання для кроку 7 (ПІД-закон регулювання): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=1\cdot 0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=155,4$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,25\%$, $\sigma=0,56\%$, $\Delta\tau=3,13$ с.

Крок 7. Моделювання у режимі ПІД-закону регулювання. Встановлені значення: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=10$ с, $\Delta_{HO}=0,2201\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.13. З отриманих результатів видно, що на виході схеми імпульсного регулятора є як імпульси “більше”, так і імпульси “менше”, пауза між першим імпульсом “більше” та другим імпульсом “менше” становить 1,4874 с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,88\%$, $\sigma=0,98\%$, $\Delta\tau=11,48$ с.

Зведені результати моделювання схеми імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням для кожного кроку представлені у табл. 2.1, підрозділ 2.2.4.

2.2.2. ПД-регулятор з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором

За допомогою формул (1.7), (1.8) розраховано мінімальну ширину зони неоднозначності для схеми ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором, зображеної на рис.1.4 (схема 3.2). Результат розрахунку: $(\Delta_{HO})_{min}=0,2753\%$.

Крок 1. Моделювання у режимі ПІ-закону регулювання. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=1\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2753\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.14. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить, 1,2757 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=1,2757/63\times 100=2,02\%$, що відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2,02\approx K_{PI}$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення $\approx 4\%$, кут нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора з широтно-імпульсним перетворювачем та виконавчим механізмом є рівним куту нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора, тривалість другого імпульсу є рівною 0,2782 с, сигнал зворотного зв'язку (X_{IH}) повторює сигнал положення виконавчого механізму (μ). Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=122,2$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,22\%$, $\sigma=0,25\%$, $\Delta\tau=12,82$ с.

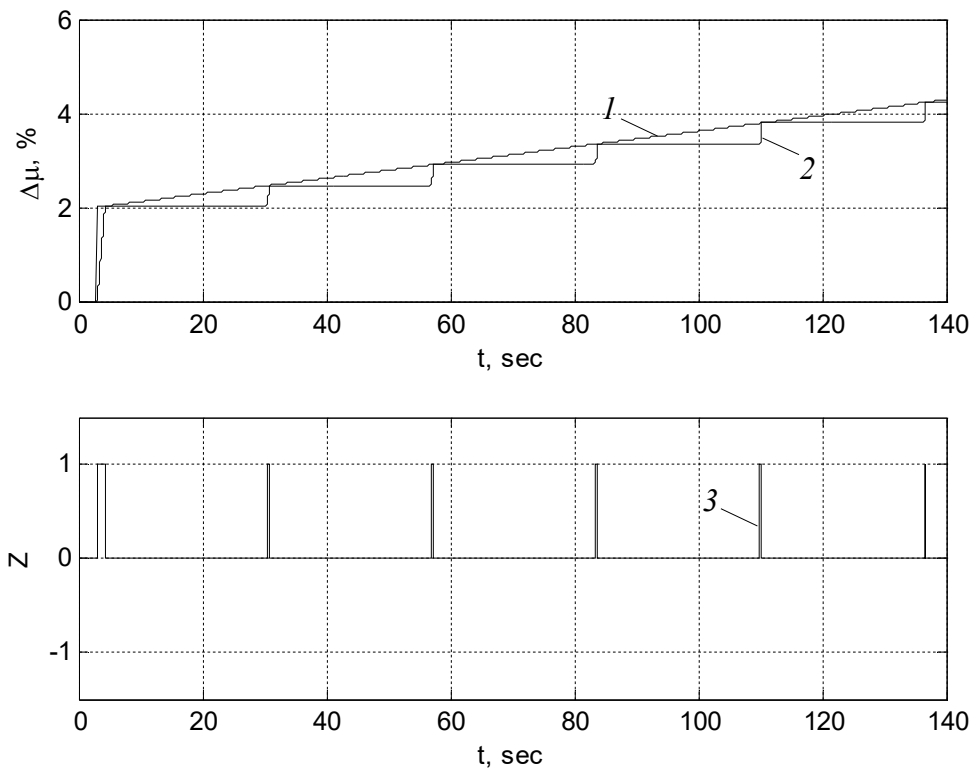


Рис.2.14. Результати моделювання для кроку 1 (ПІ-закон регулювання):

$$\Delta\varepsilon=1 \%, T_D=0 \text{ с}, \Delta_{HO}=0,2753 \%, \Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}.$$

Крок 2. Збільшення стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon$. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5 \%$, $T_D=0 \text{ с}$, $\Delta_{HO}=0,2753 \%$, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.15. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить, 6,649 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=6,649/63 \times 100=10,55 (\%)$, що відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2,11 \approx K_{PI}$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення $\approx 20\%$, тривалість другого імпульсу є рівною 0,2906 с. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=127,3 \text{ с}$. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,22 \%$, $\sigma=0,25 \%$, $\Delta\tau=2,58 \text{ с}$.

Крок 3. Збільшення зони неоднозначності. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5 \%$, $T_D=0 \text{ с}$, $\Delta_{HO}=4 \cdot 0,2753 \%$, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.16.

З отриманих результатів видно, що тривалість імпульсів та пауз між ними збільшилась, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1622 с. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=132,5$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,86$ %, $\sigma=0,99$ %, $\Delta\tau=10,29$ с.

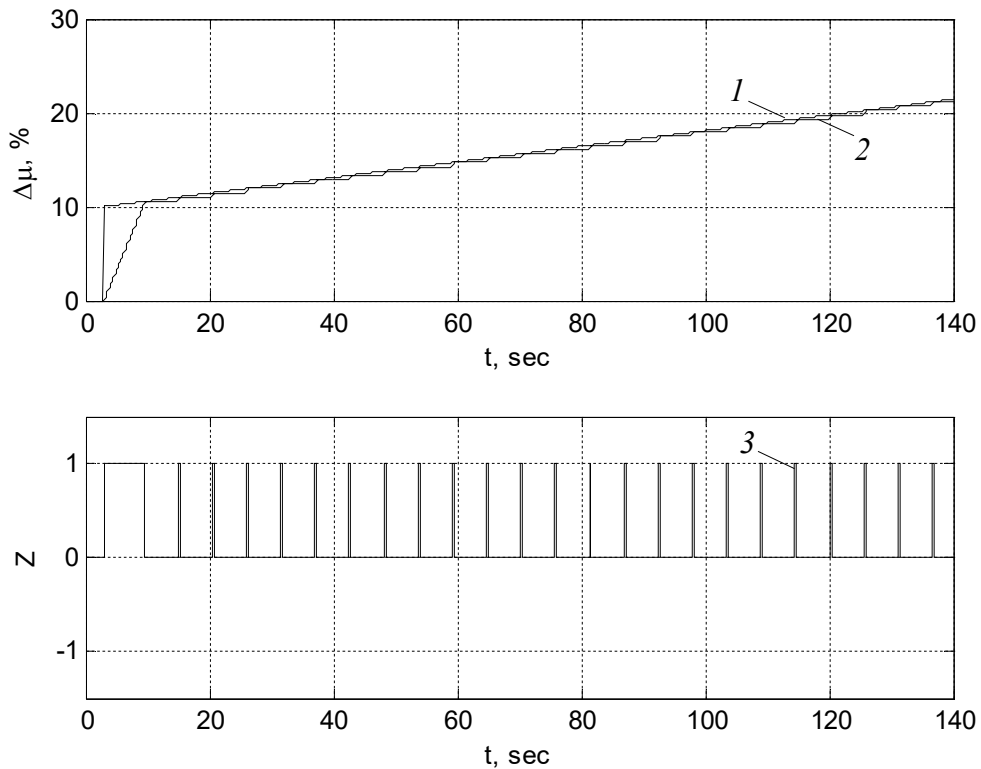


Рис.2.15. Результати моделювання для кроку 2 (збільшено стрибкоподібну зміну розузгодження): $\Delta\varepsilon=5$ %, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,2753$ %, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

Крок 4. Збільшення зони нечутливості. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot0,2753$ %, $\Delta_{HЧ}=4\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.17. З отриманих результатів видно, що кут нахилу динамічних характеристик не змінився, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1622 с, динамічна характеристика імпульсного регулятора змістилася вниз. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=110,4$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-2,62$ %, $\sigma=2,67$ %, $\Delta\tau=31,43$ с.

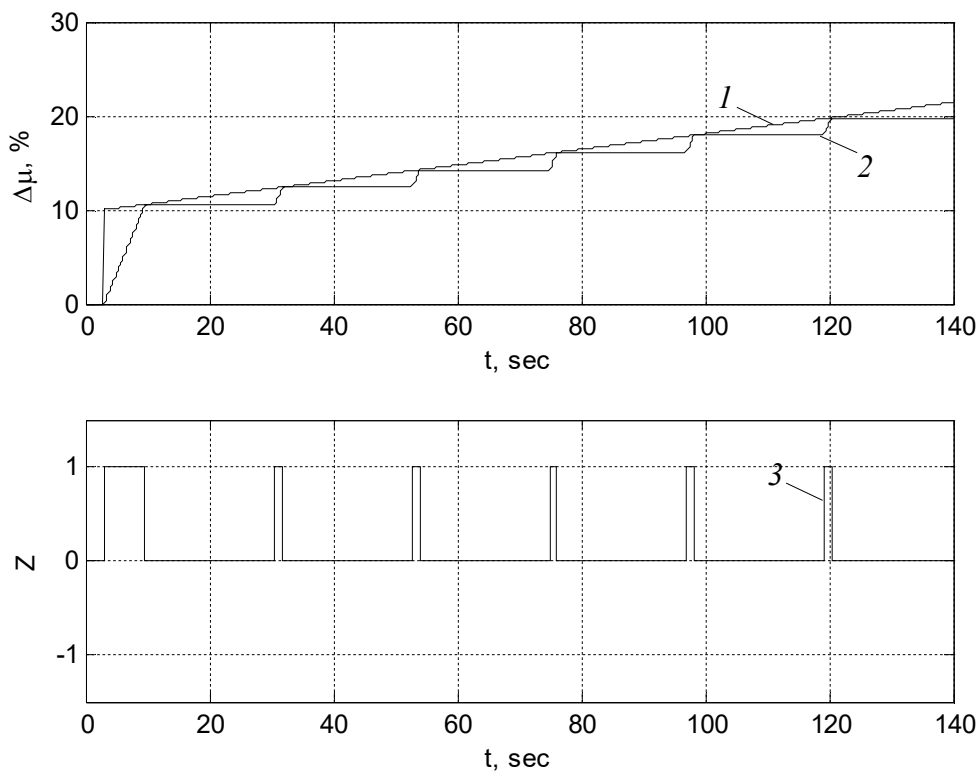


Рис.2.16. Результати моделювання для кроку 3 (збільшено зону неоднозначності):

$$\Delta\varepsilon=5 \%, T_D=0 \text{ с}, \Delta_{HO}=4\cdot 0,2753 \%, \Delta_{HЧ}=2\cdot \Delta_{HO}.$$

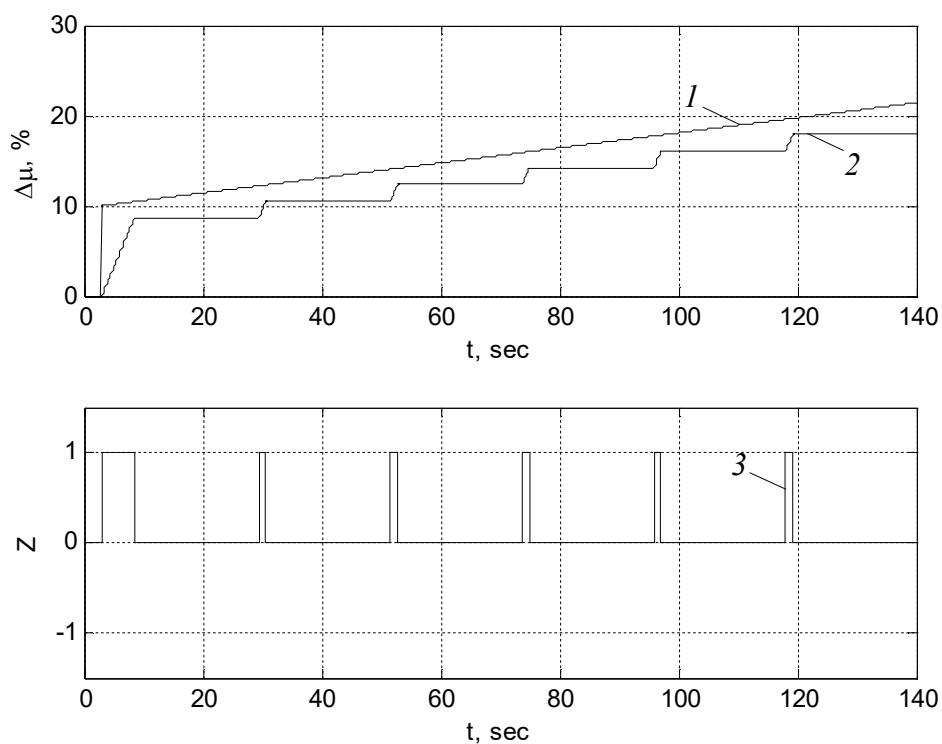


Рис.2.17. Результати моделювання для кроку 4 (збільшено зону нечутливості):

$$\Delta\varepsilon=5 \%, T_D=0 \text{ с}, \Delta_{HO}=4\cdot 0,2753 \%, \Delta_{HЧ}=4\cdot \Delta_{HO}.$$

Крок 5. Встановлення зони нечутливості рівної зоні неоднозначності. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2753\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.18. З отриманих результатів видно, що у схемі виникли автоколивання, на виході імпульсного регулятора відсутні паузи.

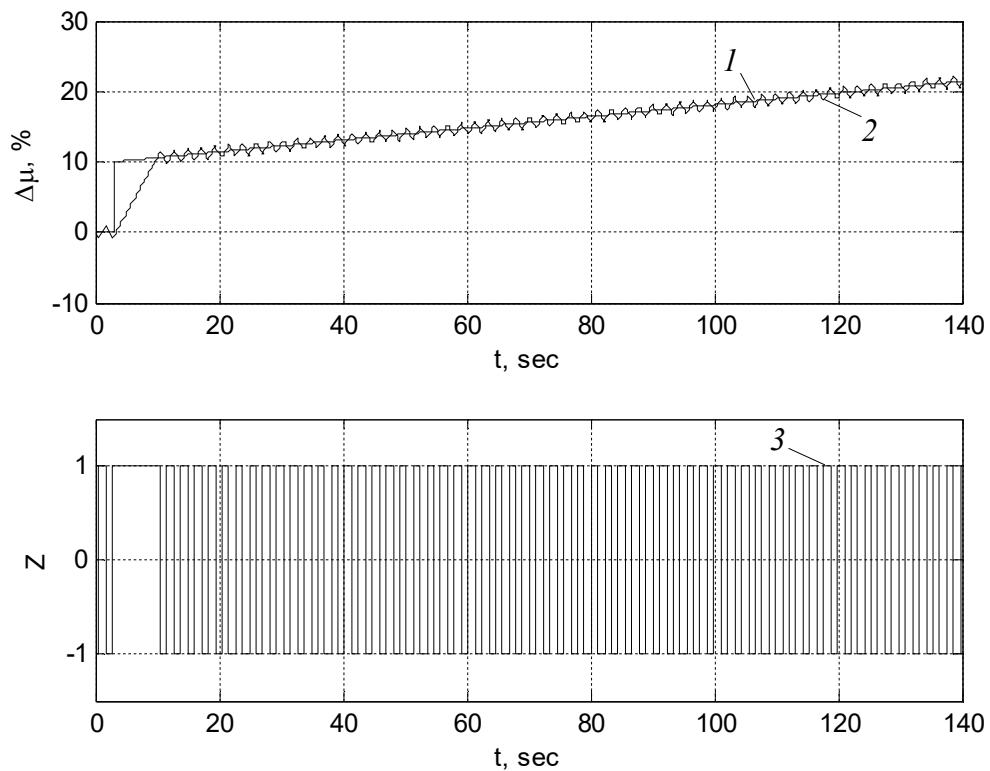


Рис.2.19. Результати моделювання для кроку 5 (зона нечутливості рівна зоні неоднозначності): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

Крок 6. Відключення від'ємної вітки трипозиційного реле у схемі ШІМ. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2753\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.19. З отриманих результатів видно, що кути нахилу обох динамічних характеристик є рівними, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1622 с. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{IZ}^M=154,1$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=0,02\%$, $\sigma=0,50\%$, $\Delta\tau=-0,28$ с.

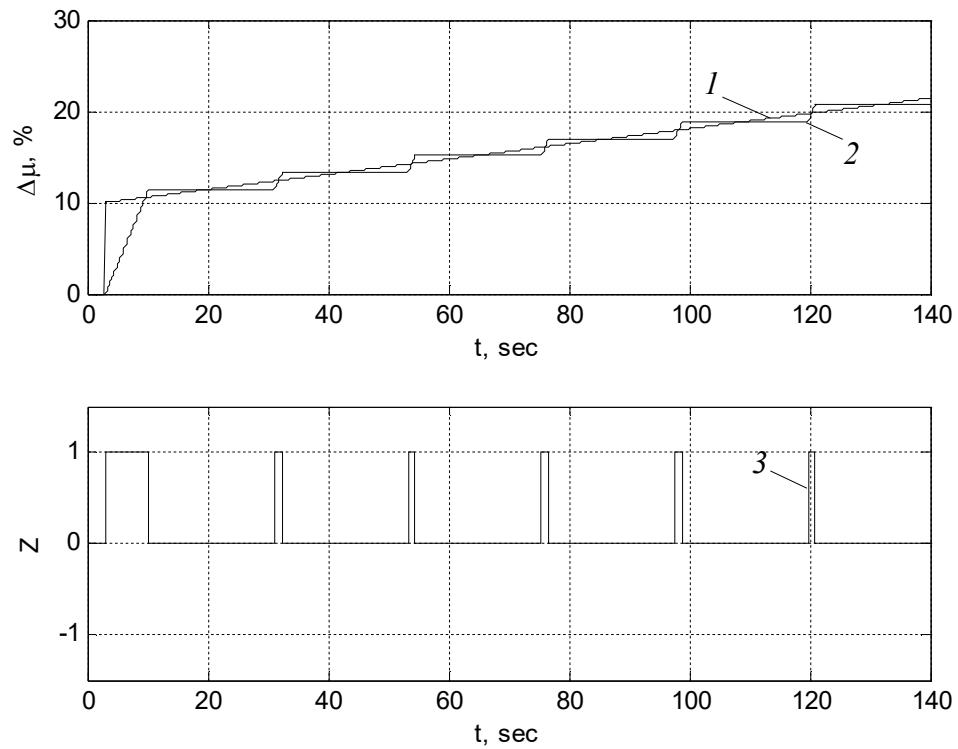


Рис.2.19. Результати моделювання для кроку 6 (відключено від'ємну вітку трипозиційного реле): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,2753\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

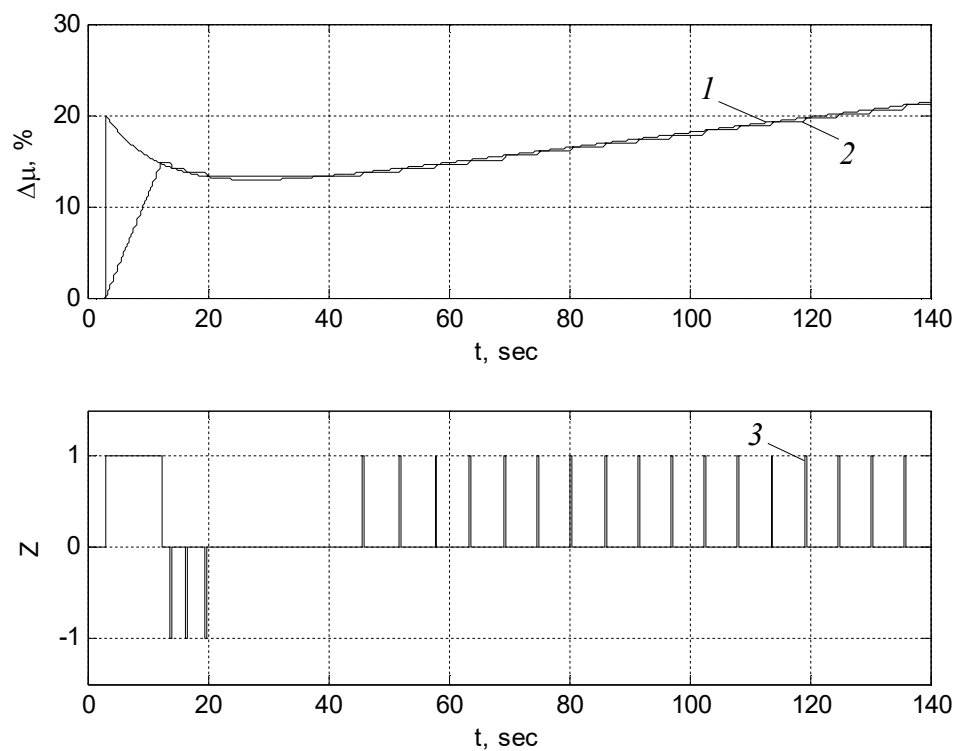


Рис.2.20. Результати моделювання для кроку 7 (ПД-закон регулювання): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=10$ с, $\Delta_{HO}=0,2753\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

Крок 7. Моделювання у режимі ПД-закону регулювання. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=10$ с, $\Delta_{HO}=0,2753\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.20. З отриманих результатів видно, що на виході схеми імпульсного регулятора є як імпульси “більше”, так і імпульси “менше”, пауза між першим імпульсом “більше” та другим імпульсом “менше” становить 1,542 с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,17\%$, $\sigma=0,49\%$, $\Delta\tau=3,96$ с.

Зведені результати моделювання схеми ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором для кожного кроку представлені у табл. 2.2, підрозділ 2.2.4.

2.2.3. ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем

За допомогою формули (1.9) розраховано мінімальну ширину зони неоднозначності для схеми ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем, зображеної на рис.1.5 (схема 3.3). Результат розрахунку: $(\Delta_{HO})_{min}=0,4398\%$.

Крок 1. Моделювання у режимі П-закону регулювання для мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon_{min}$. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=1\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.21. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить, 1,2734 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=1,2734/63\times 100=2,02(\%)$, що відповідає дії пропорційної складової П-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2,02\approx K_P$), за рахунок дії інтегральної складової П-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення $\approx 4\%$, кут нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора з імітованим позиціонером та виконавчим механізмом є рівним куту нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора, тривалість другого імпульсу є рівною 0,28 с (визначено з графіка $Z(t)$, $30,9414-30,6614=0,28$), сигнал зворотного зв'язку (X_{IH}) повторює

сигнал положення виконавчого механізму (μ). Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=133,2$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,21$ %, $\sigma=0,25$ %, $\Delta\tau=12,59$ с.

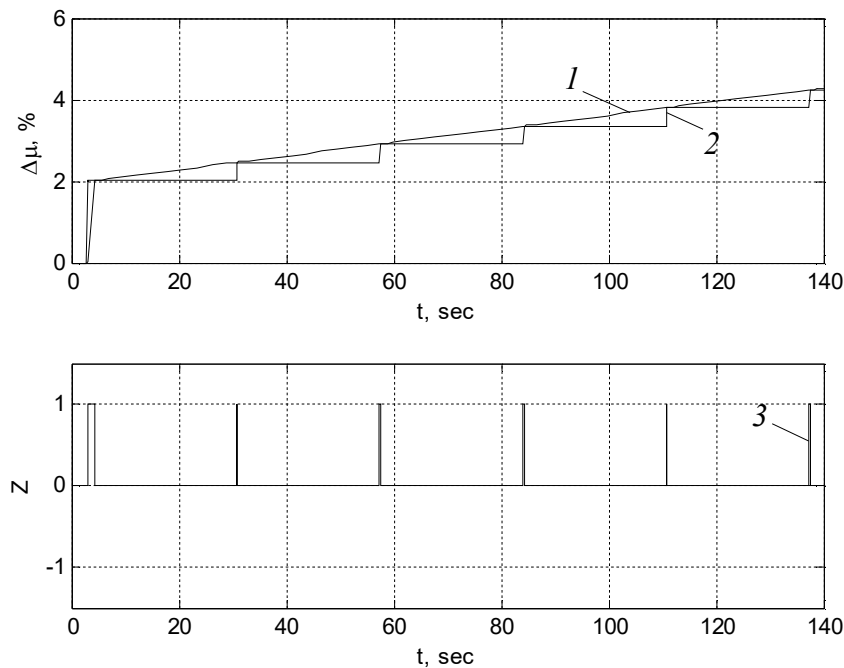


Рис.2.21. Результати моделювання для кроку 1 (ПІ-закон регулювання):

$$\Delta\varepsilon=1 \text{ \%}, T_D=0 \text{ с}, \Delta_{HO}=0,4398 \text{ \%}, \Delta_{HC}=2 \cdot \Delta_{HO}.$$

Крок 2. Збільшення стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon$. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5$ %, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,4398$ %, $\Delta_{HC}=2 \cdot \Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.22. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить, 6,6491 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=6,6491/63 \times 100=10,55$ (%), що відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2,11 \approx K_{PI}$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення $\approx 20\%$, кут нахилу (діапазон зміни) обох динамічних характеристик збільшився, тривалість імпульсів та їх частота збільшились,

тривалість другого імпульсу є рівною 0,2924 с. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=128,2$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,21$ %, $\sigma=0,25$ %, $\Delta\tau=2,56$ с.

Крок 3. Збільшення зони неоднозначності. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5$ %, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398$ %, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.23. З отриманих результатів видно, що тривалість імпульсів та пауз між ними збільшилась, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1697 с. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=133,5$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,86$ %, $\sigma=1,00$ %, $\Delta\tau=10,31$ с.

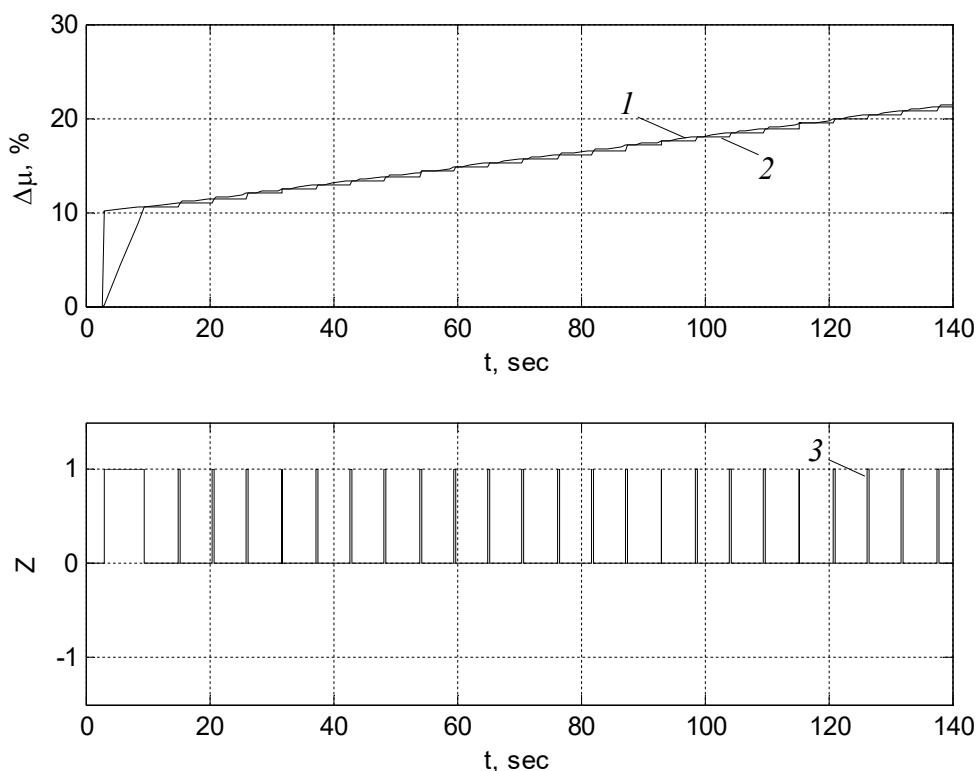


Рис.2.22. Результати моделювання для кроку 2 (збільшено стрибкоподібну зміну розузгодження): $\Delta\varepsilon=5$ %, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=0,4398$ %, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

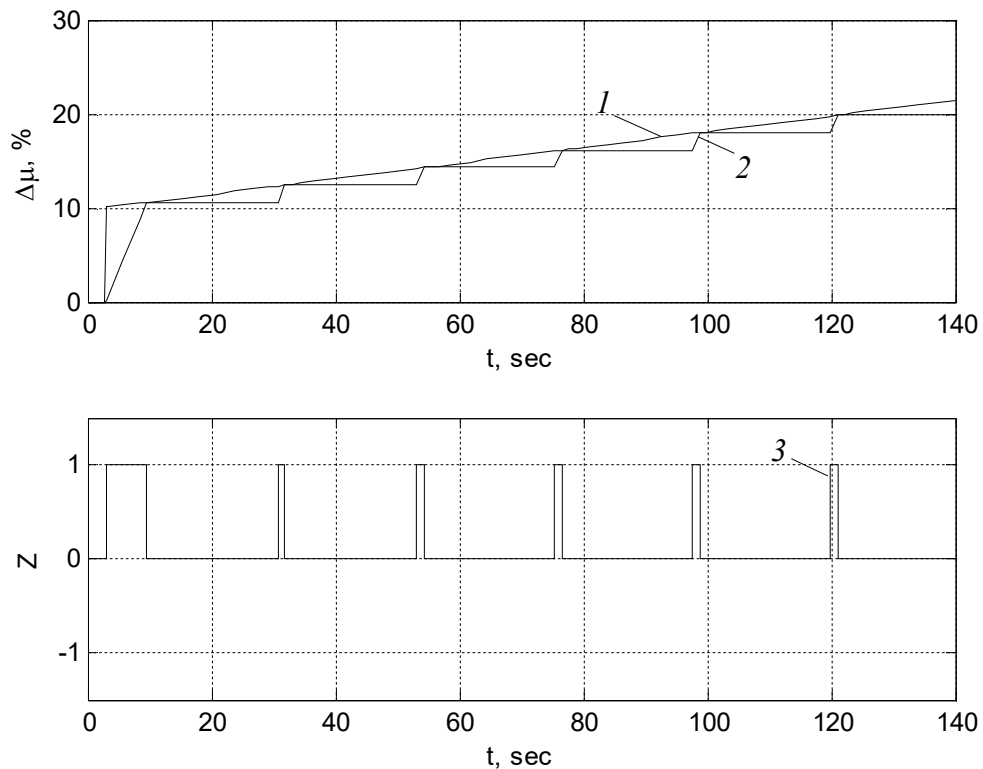


Рис.2.23. Результати моделювання для кроку 3 (збільшено зону неоднозначності):

$$\Delta\varepsilon=5\%, T_D=0\text{ с}, \Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%, \Delta_{HC}=2\cdot\Delta_{HO}.$$

Крок 4. Збільшення зони нечутливості. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0\text{ с}$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HC}=4\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.24. З отриманих результатів видно, що кут нахилу динамічних характеристик не змінився, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1697 с, динамічна характеристика імпульсного регулятора змістилася вниз на величину 1,7592, що дорівнює $\Delta_{HC}/2-\Delta_{HO}$. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=111\text{ с}$. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-2,63\%$, $\sigma=2,68\%$, $\Delta\tau=31,62\text{ с}$.

Крок 5. Встановлення зони нечутливості рівної зоні неоднозначності. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0\text{ с}$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HC}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.25. З отриманих результатів видно, що у схемі виникли автоколивання, на виході імпульсного регулятора відсутні паузи.

Крок 6. Відключення від'ємної вітки трипозиційного реле у схемі аналого-імпульсного перетворювача. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.26. З отриманих результатів видно, що кути нахилу обох динамічних характеристик є рівними, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1697 с. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{IЗ}^M=155$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=0,02\%$, $\sigma=0,50\%$, $\Delta\tau=-0,29$ с.

Крок 7. Моделювання у режимі ПД-закону регулювання. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=10$ с, $\Delta_{HO}=0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.27. З отриманих результатів видно, що на виході схеми імпульсного регулятора є як імпульси “більше”, так і імпульси “менше”, пауза між першим імпульсом “більше” та другим імпульсом “менше” становить 1,5548 с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,18\%$, $\sigma=0,49\%$, $\Delta\tau=4,03$ с.

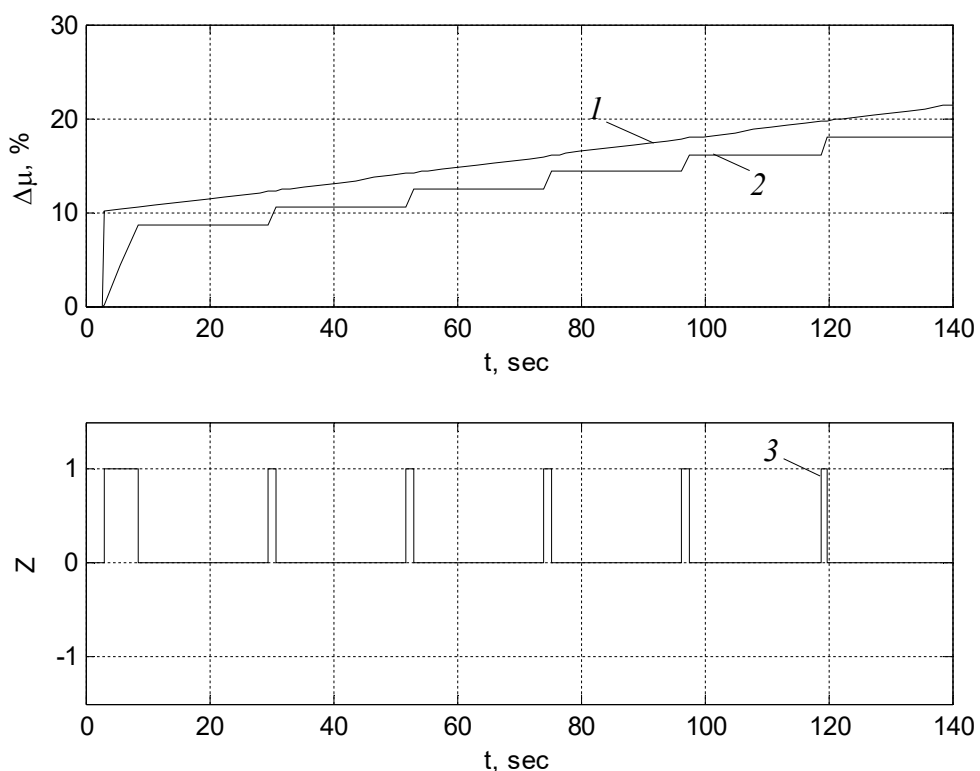


Рис.2.24. Результати моделювання для кроку 4 (збільшено зону нечутливості):

$$\Delta\varepsilon=5\%, T_D=0 \text{ с}, \Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%, \Delta_{HЧ}=4\cdot\Delta_{HO}.$$

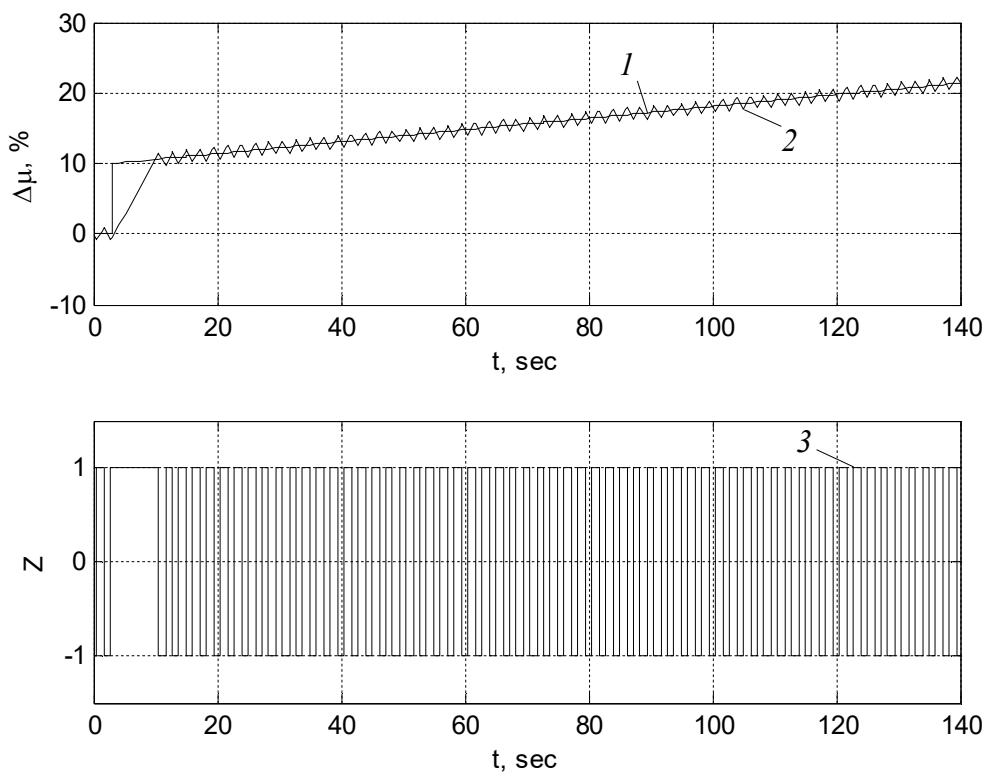


Рис.2.25. Результати моделювання для кроку 5 (зона нечутливості рівна зоні неоднозначності): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

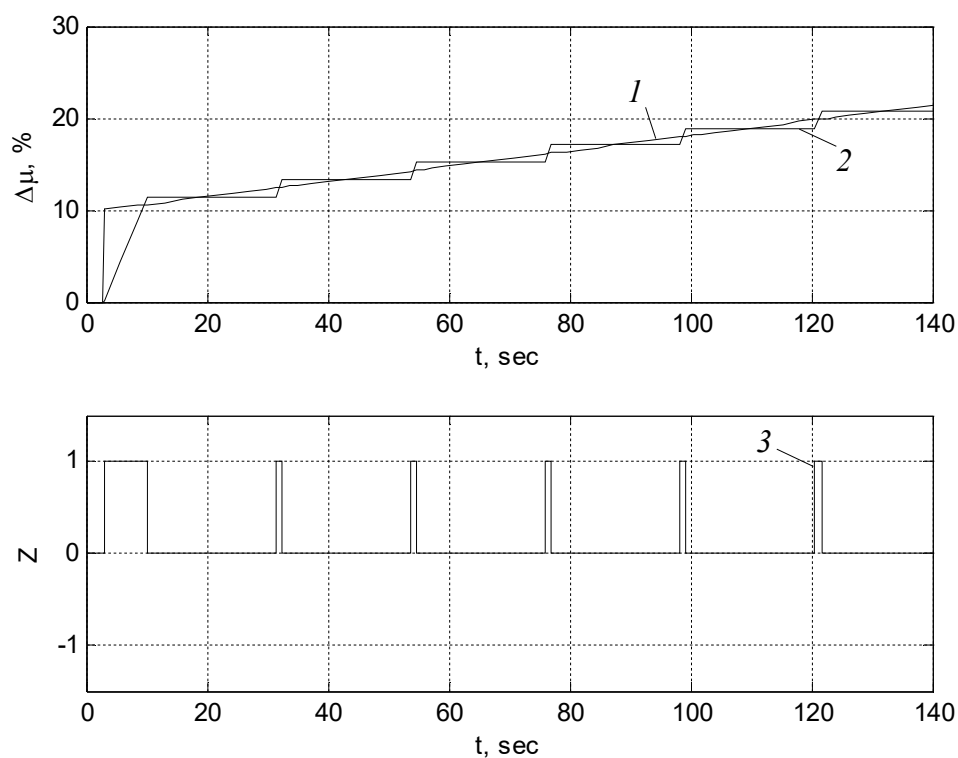


Рис.2.26. Результати моделювання для кроку 6 (відключено від'ємну вітку трипозиційного реле): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=0$ с, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

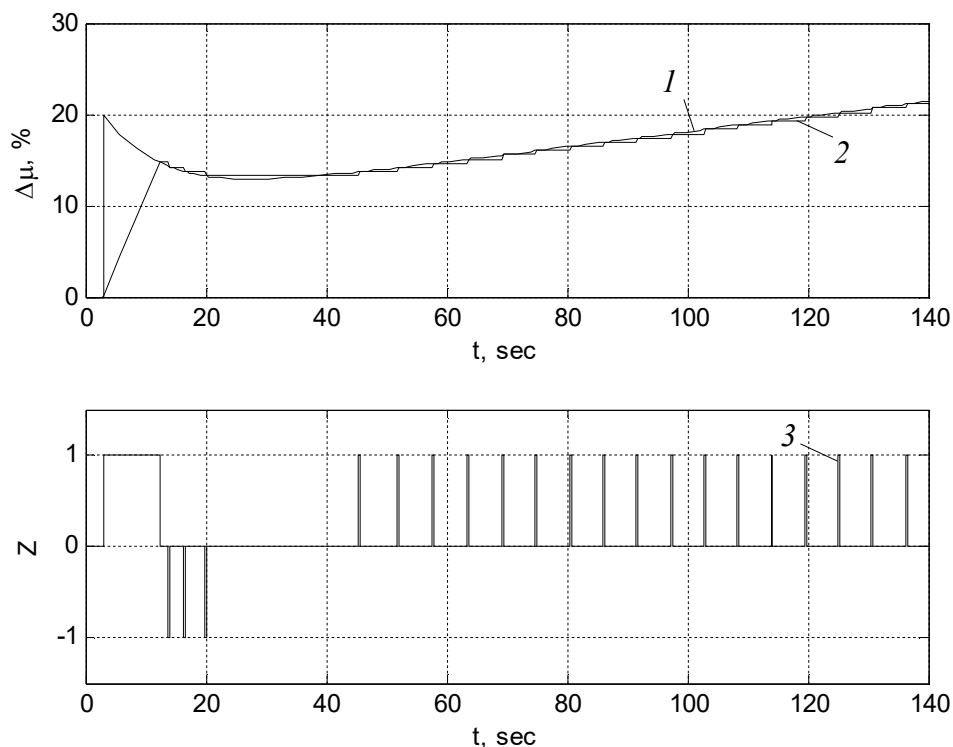


Рис.2.27. Результати моделювання для кроку 7 (ПД-закон регулювання): $\Delta\varepsilon=5\%$, $T_D=10\text{ с}$, $\Delta_{HO}=0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

Зведені результати моделювання схеми аналогового ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем для кожного кроку представлені у табл. 2.3, підрозділ 2.2.4.

2.2.4. ПІ-регулятор з генератором імпульсів

Значення мінімальної ширини зони неоднозначності для схеми ПІ-регулятора з генератором імпульсів (схеми 3.4) таке ж, як і для схеми 3.3: $(\Delta_{HO})_{min}=0,4398\%$.

Крок 1. Моделювання у режимі ПІ-закону регулювання. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=1\%$, $\Delta_{HO}=0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.28. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{il}) становить, 1,26 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{il})=1,26/63\times 100=2\%$, що точно відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{il})/\Delta\varepsilon=2=K_P$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_B) після нанесення збурення переміститься до значення $\approx 4\%$, кут нахилу динамічної характеристики імпульсного

регулятора з генератором імпульсів та виконавчим механізмом є рівним куту нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора, тривалість другого імпульсу є рівною 0,2771 с, сигнал зворотного зв'язку (X_{IH}) повторює сигнал положення виконавчого механізму (μ). Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=133,2$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,25$ %, $\sigma=0,28$ %, $\Delta\tau=14,79$ с.

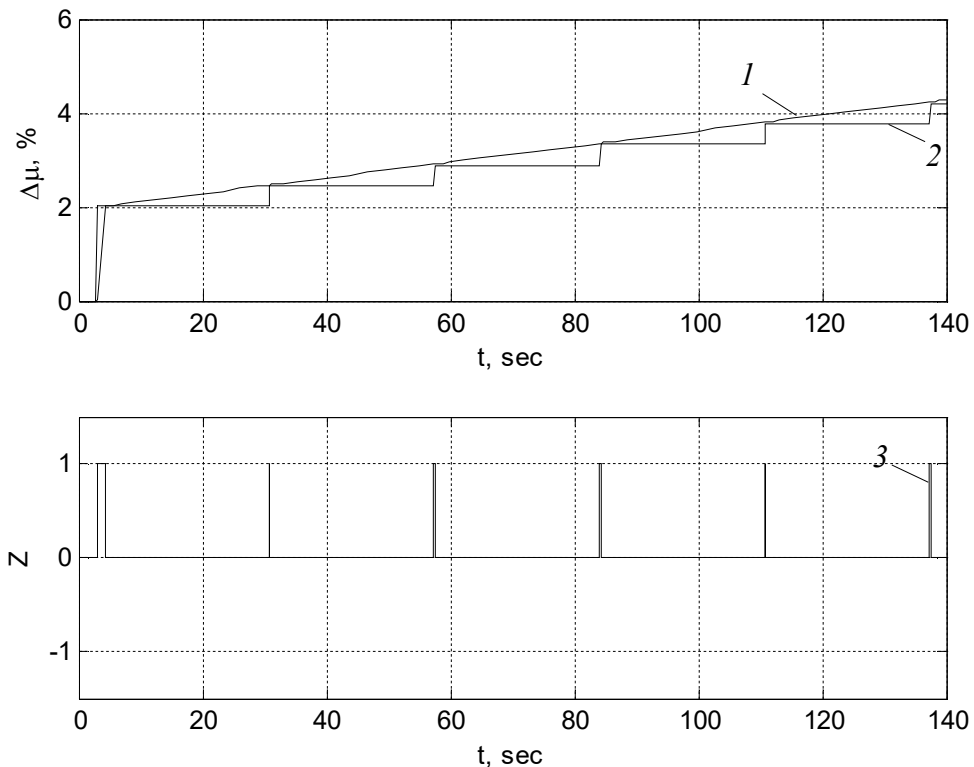


Рис.2.28. Результати моделювання для кроку 1:

$$\Delta\varepsilon=1 \%, \Delta_{HO}=0,4398 \%, \Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}.$$

Крок 2. Збільшення стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon$. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5$ %, $\Delta_{HO}=0,4398$ %, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.29. З отриманих результатів видно, що тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}) становить, 6,3 с, за час тривалості першого імпульсу виконавчий механізм перемістився на величину $\Delta\mu(\Delta t_{i1})=6,3/63 \times 100=10$ (%), що точно відповідає дії пропорційної складової ПІ-закону регулювання ($\Delta\mu(\Delta t_{i1})/\Delta\varepsilon=2=K_{II}$), за рахунок дії інтегральної складової ПІ-закону регулювання виконавчий механізм через 120 с (T_{I3}) після нанесення збурення переміститься до значення $\approx 19\%$, кут нахилу

(діапазон зміни) обох динамічних характеристик збільшився, частота імпульсів збільшились, тривалість другого імпульсу є рівною 0,2771 с. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=127,7$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-1,00$ %, $\sigma=1,02$ %, $\Delta\tau=12,04$ с.

Крок 3. Збільшення зони неоднозначності. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5$ %, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398$ %, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.30. З отриманих результатів видно, що тривалість імпульсів та пауз між ними збільшилась, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1083 с. Тривалість імпульсів (крім першого) зростає у 4 рази, так як ширина зони неоднозначності збільшилась у 4 рази. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=133$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-1,62$ %, $\sigma=1,70$ %, $\Delta\tau=19,47$ с.

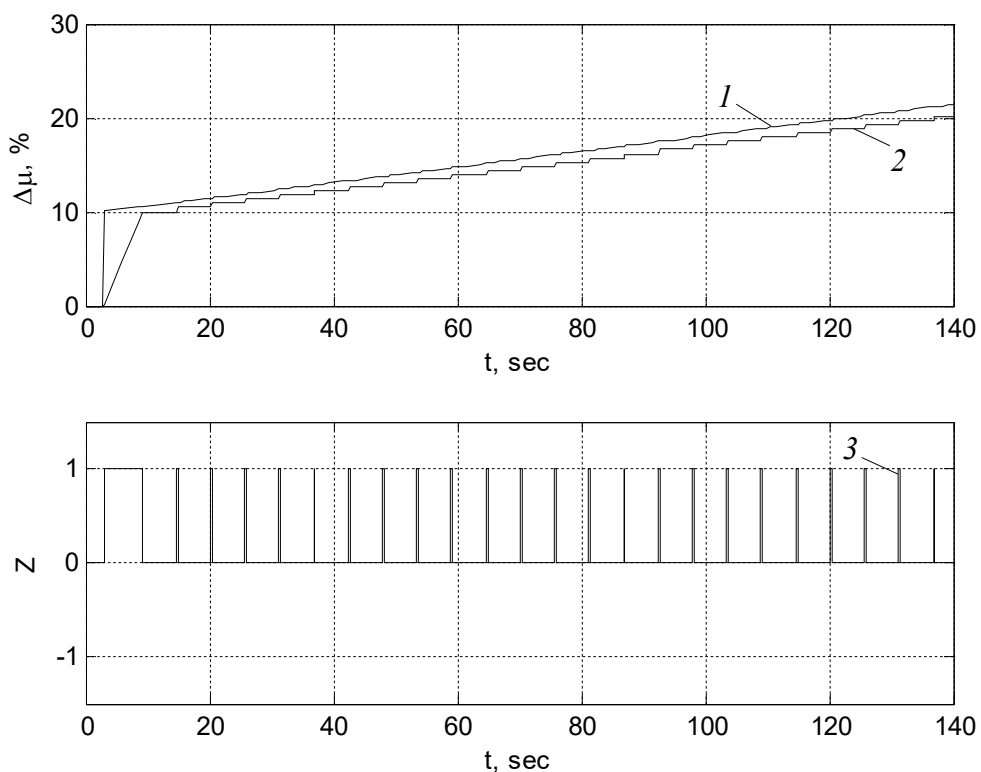


Рис.2.29. Результати моделювання для кроку 2 (збільшено стрибкоподібну зміну розузгодження): $\Delta\varepsilon=5$ %, $\Delta_{HO}=0,4398$ %, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

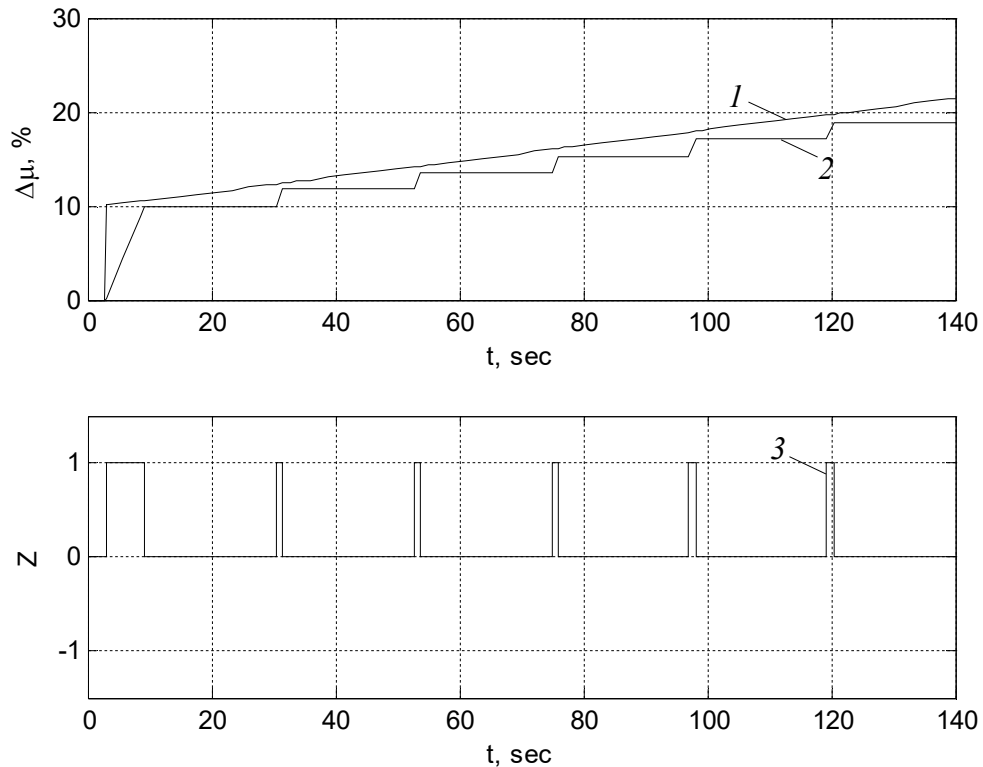


Рис.2.30. Результати моделювання для кроку 3 (збільшено зону неоднозначності):

$$\Delta\epsilon=5\%, \Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%, \Delta_{HЧ}=2\cdot \Delta_{HO}.$$

Крок 4. Збільшення зони нечутливості. Встановлені параметри: $\Delta\epsilon=5\%$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=4\cdot \Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.31. З отриманих результатів видно, що кут нахилу динамічних характеристик не змінився, тривалість другого імпульсу є рівною 1,1083 с, динамічна характеристика імпульсного регулятора змістилася вниз на величину 1,7592, що дорівнює $\Delta_{HЧ}/2-\Delta_{HO}$. Час іздрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=110,7$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-3,31\%$, $\sigma=3,35\%$, $\Delta\tau=39,68$ с.

Крок 5. Встановлення зони нечутливості рівної зоні неоднозначності. Встановлені параметри: $\Delta\epsilon=5\%$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.32. З отриманих результатів видно, що у схемі виникли автоколивання, на виході імпульсного регулятора відсутні паузи. Також нахил динамічної характеристики імпульсного ПІ-регулятора з генератором імпульсів зменшився.

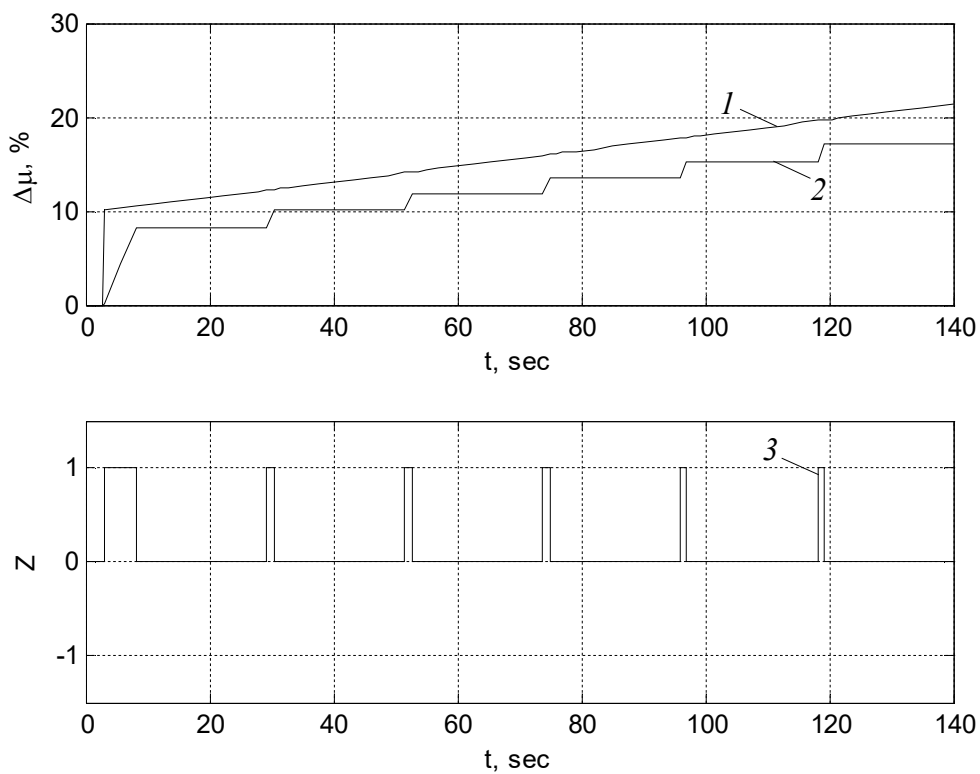


Рис.2.31. Результати моделювання для кроку 4 (збільшено зону нечутливості):

$$\Delta\varepsilon=5\%, \Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%, \Delta_{HЧ}=4\cdot \Delta_{HO}.$$

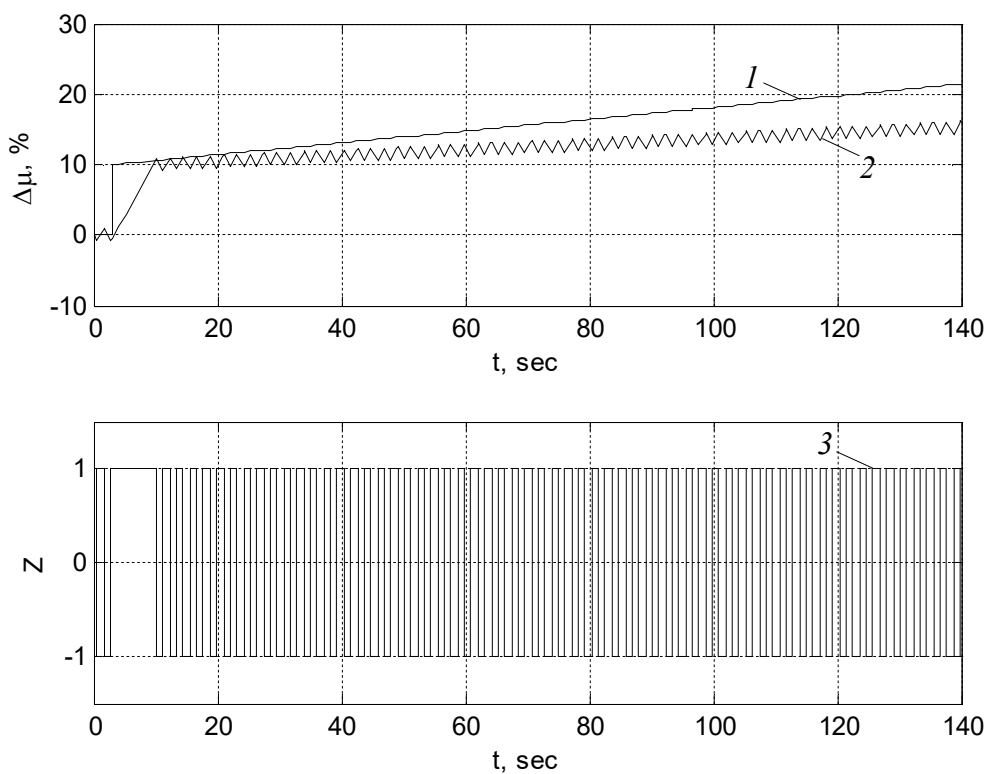


Рис.2.32. Результати моделювання для кроку 5 (зона нечутливості рівна зоні

неоднозначності): $\Delta\varepsilon=5\%$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

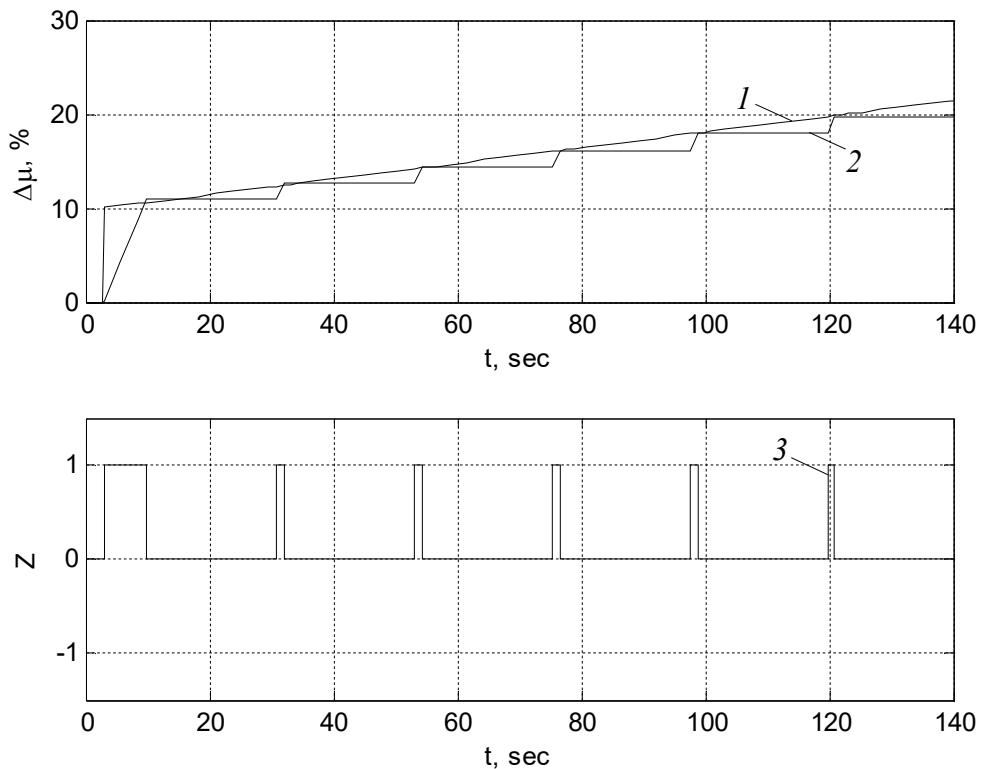


Рис.2.33. Результати моделювання для кроку 6 (відключено від'ємну вітку трипозиційного реле): $\Delta\varepsilon=5\%$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$.

Крок 6. Відключення від'ємної вітки трипозиційного реле у генератора імпульсів. Встановлені параметри: $\Delta\varepsilon=5\%$, $\Delta_{HO}=4\cdot 0,4398\%$, $\Delta_{HЧ}=\Delta_{HO}$. Результати моделювання наведені на рис.2.33. З отриманих результатів видно, що кут нахилу динамічної характеристики імпульсного регулятора з генератором імпульсів є менший за кут нахилу динамічної характеристики аналогового регулятора, а тривалість другого імпульсу є рівною 1,1083 с. Час ізодрому, на основі результатів моделювання становить $T_{I3}^M=154,6$ с. Середнє абсолютне відхилення, середньоквадратичне відхилення та середній час запізнення для ділянки перехідного процесу після першого імпульсу становлять, відповідно $\Delta=-0,78\%$, $\sigma=0,94\%$, $\Delta\tau=9,38$ с.

Результати розрахунку середнього абсолютного відхилення (Δ), середньоквадратичного відхилення (σ) та середнього часу запізнення ($\Delta\tau$), а також тривалість першого імпульсу (Δt_{i1}), першої паузи (Δt_{n1}) та другого імпульсу (Δt_{i2}) для усіх кроків виконаного моделювання на базі схем 3.1-3.4 представлені у таблицях 2.1-2.4. Для порівняння точності роботи схем імпульсних регуляторів результати розрахунку показників точності (Δ , σ , $\Delta\tau$) для кроку 2 представлені у табл. 2.5.

Таблиця 2.1

Розрахунок показників точності для схеми імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням (схема 3.1)

Крок	$\Delta\varepsilon, \%$	$\Delta_{HO}, \%$	$\Delta_{HЧ}$	$\Delta t_{i1}, \text{с}$	$\Delta t_{n1}, \text{с}$	$\Delta t_{i2}, \text{с}$	$\Delta\mu(\Delta t_{i1}), \%$	$T_{I3}^M, \text{с}$	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$	$\Delta\tau, \text{с}$
1	1	1·0,2201	2· Δ_{HO}	1,2666	29,8308	0,2800	2,01	150,5	-0,34	0,38	25,84
2	5	1·0,2201	2· Δ_{HO}	6,4714	5,4022	0,2923	10,27	130,7	-0,60	0,62	7,43
3	5	4·0,2201	2· Δ_{HO}	6,4714	23,2418	1,1651	10,27	145,9	-1,60	1,71	22,44
4	5	4·0,2201	4· Δ_{HO}	5,3063	28,8516	1,1539	8,42	149,6	-4,34	4,45	76,85
5	5	4·0,2201	1· Δ_{HO}	7,3862	0	1,0539	11,72	-	-	-	-
6	5	4·0,2201	1· Δ_{HO}	7,0582	21,1845	1,1707	11,20	155,4	-0,25	0,56	3,13
7	5	1·0,2201	2· Δ_{HO}	8,9104	1,4874	0,3323	14,14	-	-0,88	0,98	11,48

Таблиця 2.2

Розрахунок показників точності для схеми ПД-регулятора з диференціатором та ШІМ (схема 3.2)

Крок	$\Delta\varepsilon, \%$	$\Delta_{HO}, \%$	$\Delta_{HЧ}$	$\Delta t_{i1}, \text{с}$	$\Delta t_{n1}, \text{с}$	$\Delta t_{i2}, \text{с}$	$\Delta\mu(\Delta t_{i1}), \%$	$T_{I3}^M, \text{с}$	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$	$\Delta\tau, \text{с}$
1	1	1·0,2201	2· Δ_{HO}	1,2757	26,2191	0,2782	2,02	122,2	-0,22	0,25	12,82
2	5	1·0,2201	2· Δ_{HO}	6,6490	5,2438	0,2906	10,55	127,3	-0,22	0,25	2,58
3	5	4·0,2201	2· Δ_{HO}	6,6505	20,9753	1,1622	10,56	132,5	-0,86	0,99	10,29
4	5	4·0,2201	4· Δ_{HO}	5,4908	20,9753	1,1622	8,72	110,4	-2,62	2,67	31,43
5	5	4·0,2201	1· Δ_{HO}	7,5501	0	1,0463	11,98	-	-	-	-
6	5	4·0,2201	1· Δ_{HO}	7,2306	20,9752	1,1622	11,48	154,1	0,02	0,50	-0,28
7	5	1·0,2201	2· Δ_{HO}	9,2800	1,5420	0,3268	14,73	-	-0,17	0,49	3,96

Таблиця 2.3

Розрахунок показників точності для схеми ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем (схема 3.3)

Крок	$\Delta\varepsilon, \%$	$\Delta_{HO}, \%$	$\Delta_{HЧ}$	$\Delta t_{i1}, \text{с}$	$\Delta t_{n1}, \text{с}$	$\Delta t_{i2}, \text{с}$	$\Delta\mu(\Delta t_{i1}), \%$	$T_{I3}^M, \text{с}$	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$	$\Delta\tau, \text{с}$
1	1	1·0,4398	2· Δ_{HO}	1,2734	26,388	0,2800	2,02	133,2	-0,21	0,25	12,59
2	5	1·0,4398	2· Δ_{HO}	6,6491	5,2776	0,2924	10,55	128,2	-0,21	0,25	2,56
3	5	4·0,4398	2· Δ_{HO}	6,6491	21,1104	1,1697	10,55	133,5	-0,86	1,00	10,31
4	5	4·0,4398	4· Δ_{HO}	5,4793	21,1105	1,1697	8,70	111,0	-2,63	2,68	31,62
5	5	4·0,4398	1· Δ_{HO}	7,5768	0	1,0530	12,03	-	-	-	-
6	5	4·0,4398	1· Δ_{HO}	7,2339	21,1104	1,1697	11,48	155,0	0,02	0,50	-0,29
7	5	1·0,4398	2· Δ_{HO}	9,2782	1,5548	0,3287	14,73	-	-0,18	0,49	4,03

Таблиця 2.4

Розрахунок показників точності для схеми ПІ-регулятора з генератором імпульсів (схема 3.4)

Крок	$\Delta\varepsilon, \%$	$\Delta_{HO}, \%$	$\Delta_{HЧ}$	$\Delta t_{i1}, \text{с}$	$\Delta t_{n1}, \text{с}$	$\Delta t_{i2}, \text{с}$	$\Delta\mu(\Delta t_{i1}), \%$	$T_{I3}^M, \text{с}$	$\Delta, \%$	$\sigma, \%$	$\Delta\tau, \text{с}$
1	1	1·0,4398	2· Δ_{HO}	1,2600	26,3880	0,2771	2	133,2	-0,25	0,28	14,79
2	5	1·0,4398	2· Δ_{HO}	6,3000	5,2776	0,2771	10	127,7	-1,00	1,02	12,04
3	5	4·0,4398	2· Δ_{HO}	6,3000	21,1104	1,1083	10	133	-1,62	1,70	19,47
4	5	4·0,4398	4· Δ_{HO}	5,1917	21,1104	1,1083	8,24	110,7	-3,31	3,35	39,68
5	5	4·0,4398	1· Δ_{HO}	7,1790	0	1,1083	11,40	-	-	-	-
6	5	4·0,4398	1· Δ_{HO}	6,8541	21,1104	1,12	10,88	154,6	-0,78	0,94	9,38
7	5	1·0,4398	2· Δ_{HO}	8,8898	1,6675	0,3241	14,1108	-	-0,77	0,87	17,56

Таблиця 2.5

Порівняння точності роботи різних схем імпульсних регуляторів

Назва схеми	Δ , %	σ , %	$\Delta\tau$, с
Імпульсний ПД-регулятор з подвійним диференціюванням (схема 3.1)	-0,60	0,62	7,43
ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ (схема 3.2)	-0,22	0,25	2,58
ПД-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

Із отриманих результатів (табл. 2.1-2.4) видно, що для мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження $\Delta\varepsilon = 1$ % (крок 1) переміщення виконавчого механізму за час тривалості першого імпульсу $\Delta\mu(\Delta t_{i1})$ приблизно відповідає дії пропорційної складової ПІ- закону регулювання ($K_{PI} = 2$) для схем 3.1-3.3 і чітко дорівнює заданому значенню для схеми 3.4. Час іздрому для усіх схем приблизно дорівнює заданому значенню ($T_{IZ} = 120$ с), проте найближче до заданого значення забезпечує схема 3.2. Тривалість другого імпульсу рівна заданому значенню $(\Delta t_i)_{min} = 0,28$ с для схем 3.1 та 3.3. У схемі 3.2 тривалість другого імпульсу є меншою, ніж задане значення, що пояснюється наявністю реального диференціатора між аналоговим ПД-регулятором та ШІМ у цій схемі. У схемі 3.4 тривалість другого імпульсу також є меншою, ніж задане значення, що пояснюється наявністю ключа у цій схемі.

Збільшення величини стрибкоподібного розузгодження (крок 2) приводить до збільшення тривалості першого імпульсу та до зменшення тривалості першої паузи для усіх схем, а також до збільшення тривалості другого імпульсу для схем 3.1-3.3. У схемі 3.4 тривалість другого імпульсу залишилася незмінною.

Збільшення зони неоднозначності (крок 3) приводить до збільшення тривалості другого імпульсу та першої паузи, а тривалість першого імпульсу залишилася такою ж, як на кроці 2.

Збільшення зони нечутливості трипозиційного реле (крок 4) приводить до зменшення тривалості першого імпульсу для усіх схем.

Встановлення зони нечутливості рівною зоні неоднозначності $\Delta_{НЧ} = \Delta_{НО}$ (крок 5) приводить до виникнення автоколивань у всіх схемах.

Відключення від'ємної вітки трипозиційного реле (крок 6) забезпечує відсутність автоколивань. Числові значення показників точності (Δ , σ , $\Delta\tau$) на цьому кроці є найменшими за абсолютною величиною (точність є найвищою).

Введення диференціальної складової у закон регулювання (крок 7) приводить до збільшення тривалості першого імпульсу, що зумовлене дією диференціальної складової. Числові значення показників точності (Δ , σ , $\Delta\tau$) при виконанні моделювання на кроках 1-5 зростають. Виняток становить лише середній час запізнення ($\Delta\tau$) на кроках 2 і 3.

Із таблиці 2.5 видно, що числові значення показників точності (Δ , σ , $\Delta\tau$) для другого кроку моделювання є найбільшими за абсолютною величиною для схеми 3.4, а найменшими – для схем 3.2 та 3.3. Проте, у схемі 3.2 тривалість другого імпульсу є меншою, ніж задане значення. Тому, найкращою схемою імпульсного ПД-регулятора для керування електричним виконавчим механізмом є схема 3.3 – схема з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем.

На основі виконаного моделювання та запропонованих показників точності досліджено чотири схеми імпульсних регуляторів, які призначені для роботи з виконавчими механізмами інтегруючої дії. Встановлено, що найкращу точність забезпечує схема 3.3 (ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем).

2.3. Удосконалення алгоритму автоматичного регулятора з широтно-імпульсним модулятором

Широтно-імпульсна модуляція часто застосовується при автоматизації технологічних процесів, зокрема для керування швидкістю обертання електричного двигуна, а також для керування тепловим об'єктом [129]-[131]. Застосування широтно-імпульсного модулятора (ШІМ) у складі автоматичного регулятора дає можливість ефективно керувати тепловим об'єктом із високою якістю перехідних процесів. Ще один випадок застосування ШІМ – це імпульсний ПД регулятор для керування електричним виконавчим механізмом із постійною швидкістю переміщення. Схема такого регулятора побудована на основі аналогового ПД регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором [9].

Динамічна характеристика роботи алгоритму ШІМ на базі генератора пилоподібних коливань та компаратора представлена на рис.2.34. Спрощена блок-схема цього алгоритму наведена на рис.2.35. Алгоритм виконується в межах одного скан-циклу контролера.

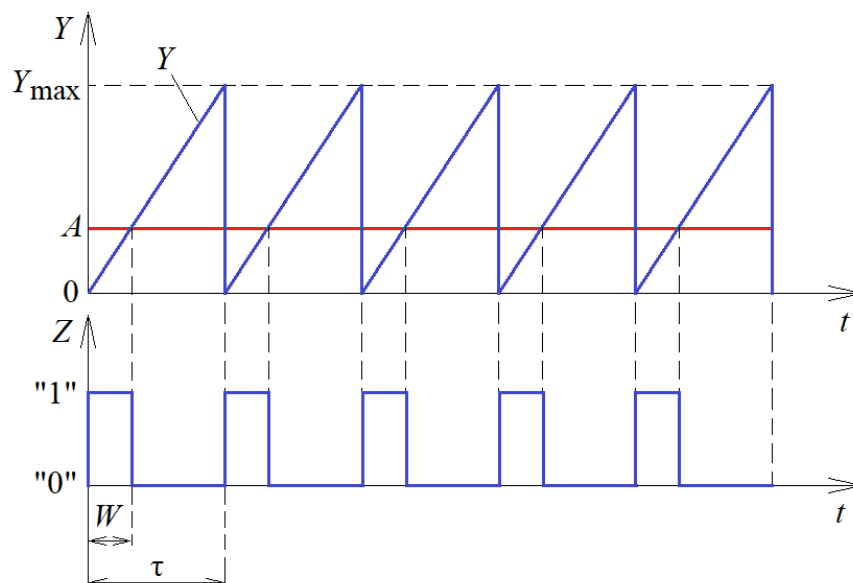


Рис.2.34. Динамічна характеристика роботи ШІМ на базі генератора пилоподібних коливань.

Алгоритм на базі генератора пилкоподібних коливань сьогодні застосовується у більшості промислових програмовано-логічних контролерах для реалізації ШІМ.

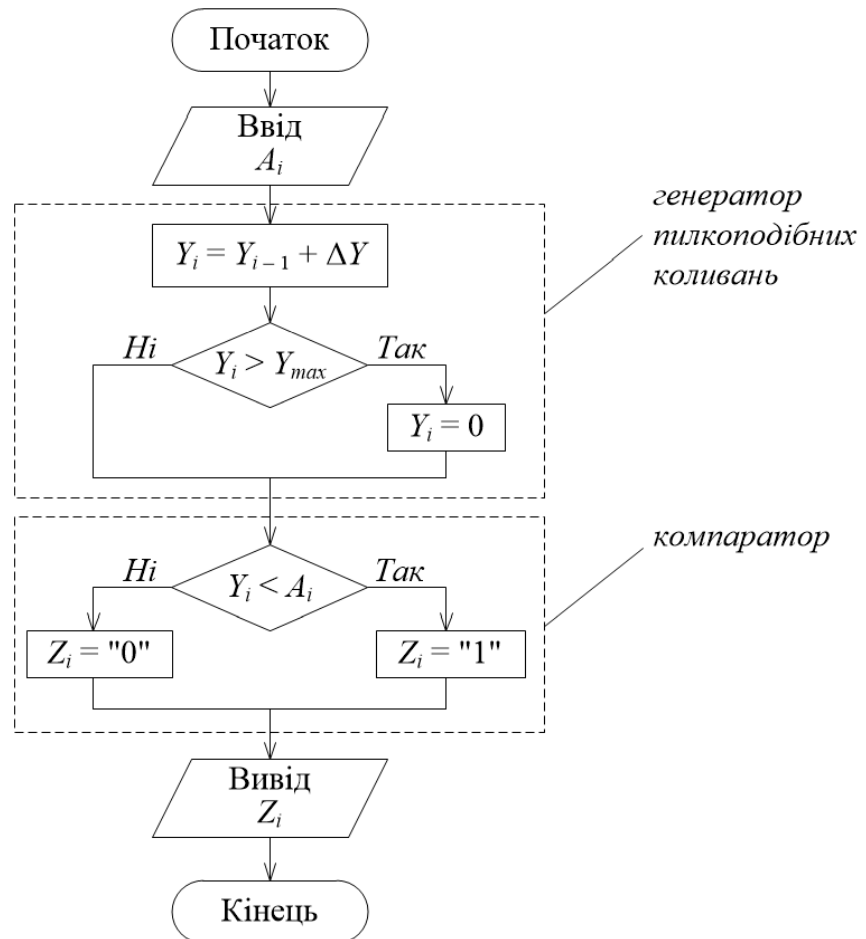


Рис.2.35. Спрощена блок-схема алгоритму ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань та компаратора.

Алгоритм ШІМ на базі схеми з інтегруючою ланкою та релейним елементом застосований у мікропроцесорному регуляторі ПРОТАР-110 [117]. для реалізації ШІМ. Алгоритм, представлений на рис.2.36, виконується в межах одного скан-циклу тривалістю Δt .

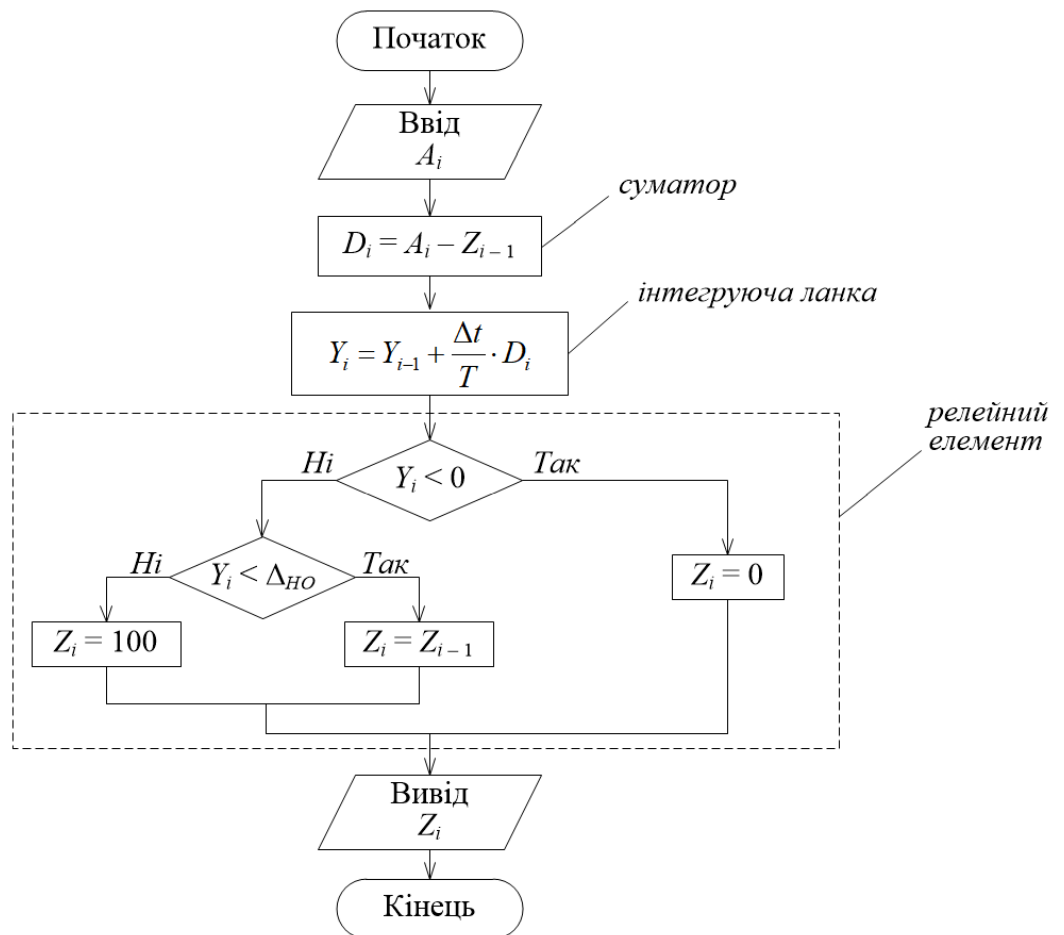


Рис.2.36. Спрощена блок-схема алгоритму ШІМ на базі інтегруючої ланки та релейного елемента.

2.3.1. Способи керування тепловими об'єктами

Теплові об'єкти вирізняються високою інерційністю та довгою тривалістю перехідних процесів у них. Тому, для керування тепловими об'єктами, як правило, застосовують двопозиційний регулятор. Такий регулятор є простим в налаштуванні та реалізації. Структурна схема каналу регулювання з двопозиційним регулятором представлена на рис.1.19.

Приклад перехідного процесу в системі автоматичного регулювання з двопозиційним регулятором представлено на рис.2.37. Об'єктом регулювання є електрична піч, через яку протікає повітря. Регулюючою дією є електрична потужність на вході печі, а регульованим параметром – температура повітря. Детальний опис цього об'єкта представлено у [11]. Перехідний процес,

представлений на рис.2.37, був отриманий із застосуванням математичної моделі об'єкта регулювання [11], яка була реалізована у програмовано-логічному контролері (ПЛК) МІК-51 компанії Мікрол [132], [133]. Автоматичним регулятором був ПЛК Jazz (JZ10-11-R16) компанії Unitronics [134]. Для реєстрації сигналів був застосований програмний пакет МІК-реєстратор 1.1.14 [135], який дає можливість реєструвати декілька сигналів з періодом реєстрації 1 с. Двопозиційний регулятор був налаштований наступним чином: він був увімкнений, коли температура була нижчою за 59,5 °С, та вимкнений, коли температура перевищувала 60,5 °С.

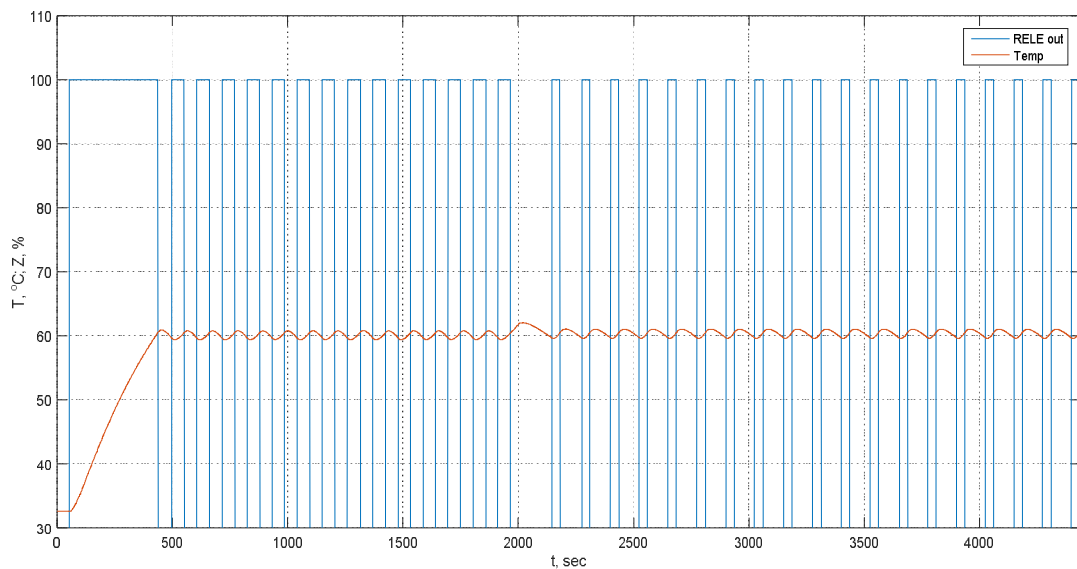


Рис.2.37. Перехідний процес в САР з двопозиційним регулятором.

Перехідний процес на рис.2.37 складається з двох частин. Перша частина (0 ... 1980 с) – вихід об'єкта на номінальний режим. Друга частина (1980 с ...) – відпрацювання збурення, яке було нанесене шляхом зменшення витрати повітря через піч. Період імпульсів в кінці першої частини переходного процесу становив 107 с, шпаруватість – 50%, а максимальна амплітуда коливань регульованого параметра – 0,8 °С. В кінці другої частини переходного процесу період імпульсів становив 125 с, шпаруватість – 30 %, а максимальна амплітуда коливань – 1,0 °С.

Недоліком двопозиційного регулятора є авто-коливний процес у системі регулювання. Зменшити амплітуду коливань регульованого параметра можна шляхом зменшення ширини зони неоднозначності двопозиційного реле. Проте є

мінімальне значення, нижче якого встановлювати ширину зони неоднозначності не можна. Це значення визначається похибкою вимірювального перетворювача регульованого параметра.

Для усунення автоколивань в САР застосовують ПІД регулятор з ШІМ [125], [7]. У цьому випадку на вхід об'єкта регулювання поступає імпульсний сигнал із на багато меншим періодом імпульсів, ніж у випадку застосування двопозиційного регулятора. Період імпульсів встановлюється шляхом налаштування алгоритму ШІМ, а шпаруватість імпульсів визначається вихідним сигналом ПІД регулятора. Структурна схема каналу регулювання з ПІД регулятором та ШІМ представлена на рис.1.15. Приклад перехідного процесу в САР на базі ПІД регулятора з ШІМ, реалізованого за допомогою ПЛК Jazz (JZ10-11-R16), представлено на рис.2.38. Період імпульсів тут становить 20 с. Встановлені параметри налаштування ПІД регулятора у ПЛК Jazz відповідали таким значенням: коефіцієнт пропорційності $K_{П} = 30 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, стала часу ізодрому $T_{ІЗ} = 200 \text{ с}$, стала часу диференціювання $T_{Д} = 0 \text{ с}$.

Перехідний процес, представлений на рис.2.38, отримано із застосуванням алгоритму ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань, блок-схема якого наведена на рис.2.35.

Із рис.2.38 видно, що у САР на базі ПІД регулятора з ШІМ відсутні автоколивання і температура підтримується на заданому значенні без автоколивань. Проте, під час перехідного процесу спостерігалось часте (зайве) спрацювання вихідного релейного контакту (брязкіт контакту). Це видно на зареєстрованому тренді перехідного процесу (рис.2.38, збільшені графіки), де після довгого імпульсу є короткий імпульс (вказано червоною стрілкою). Необхідно зазначити, що тренд перехідного процесу зареєстровано з кроком одна точка за одну секунду, тобто мала місце дискретизація сигналу в часі. Тому, на графіку зафіксовані не усі зайві спрацювання контакту, а лише ті, які відбулися у момент опитування та запису сигналу. Усі спрацювання контакту під час спостереження за перехідним процесом можна було чути за звуком, який видавав контакт при спрацюванні. Зайвих спрацювань (брязкотів контакту) насправді було на багато більше, ніж це зафіксовано на тренді, представленому на рис.2.38.

Брязкіт релейного контакту – це негативне явище, яке приводить до виходу з ладу технологічного обладнання [136], [137]. Для усунення цього небажаного явища запропоновано удосконалений алгоритм ШІМ.

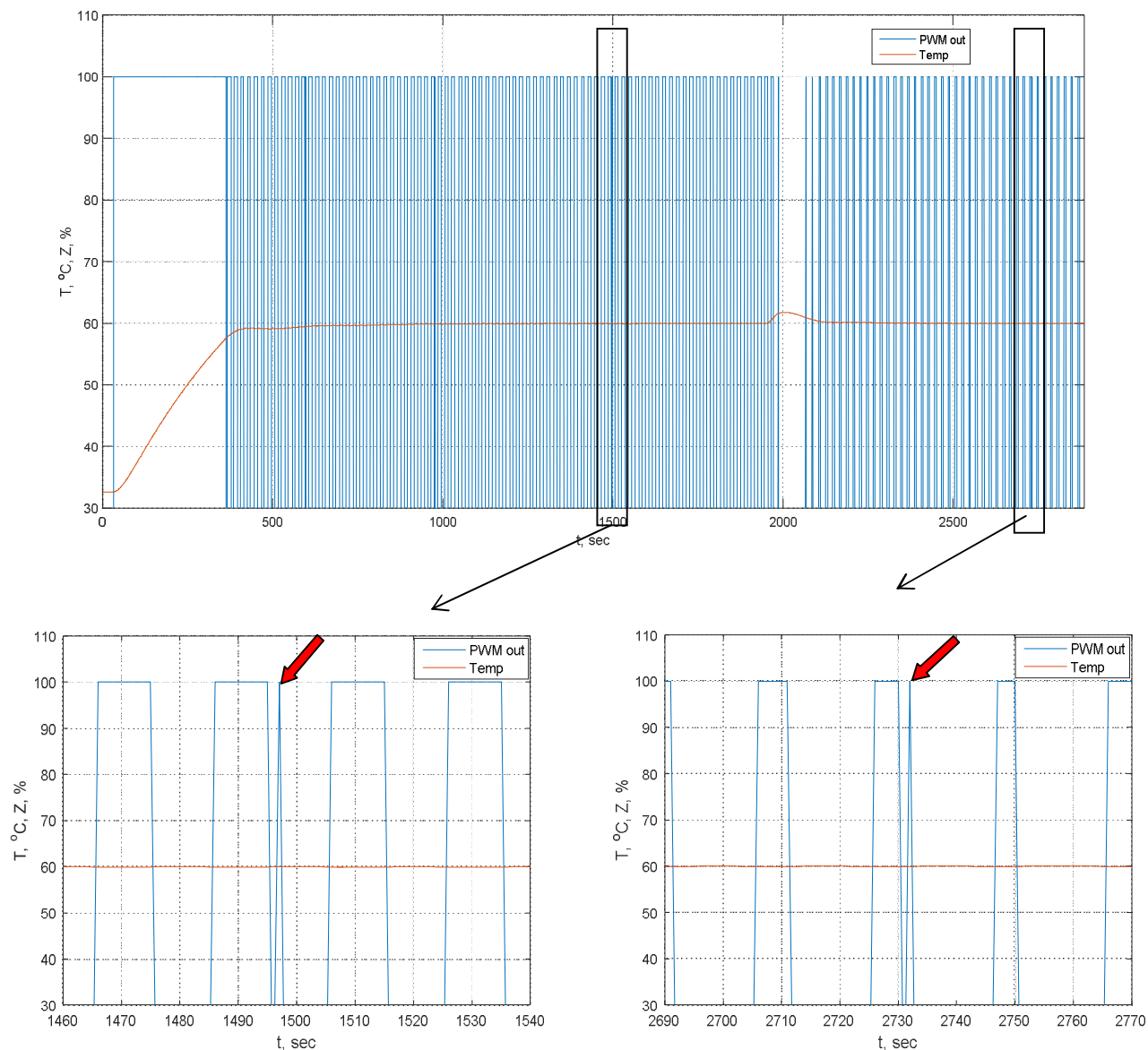


Рис.2.38. Перехідний процес в САР з ПІД регулятором та ШІМ (алгоритм ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань).

2.3.2. Удосконалений алгоритм автоматичного регулятора з ШІМ

Високочастотне зайве спрацювання вихідного релейного контакту (брязкіт контакту), що спостерігалось під час перехідного процесу, представленого на рис.2.38, було зумовлене коливанням оцифрованого вхідного аналогового сигналу

внаслідок роботи аналого-цифрового перетворювача та наявності шумів у аналоговому сигналі. Оскільки контролер JAZZ працює лише із цілочисельними змінними (Integer) і профільувати оцифрований аналоговий сигнал у цьому контролері неможливо, то це приводить до суттєвого коливання вихідного аналогового сигналу ПД алгоритму, що зумовлене дією пропорційної складової ПД закону регулювання при $K_D > 1$. А вихідний сигнал ПД алгоритму є завданням шпаруватості для ШІМ (A). І, як наслідок, компаратор ШІМ, який відповідає за формування імпульсного вихідного сигналу, спрацьовує занадто часто. Це явище зображено схематично на рис.2.39.

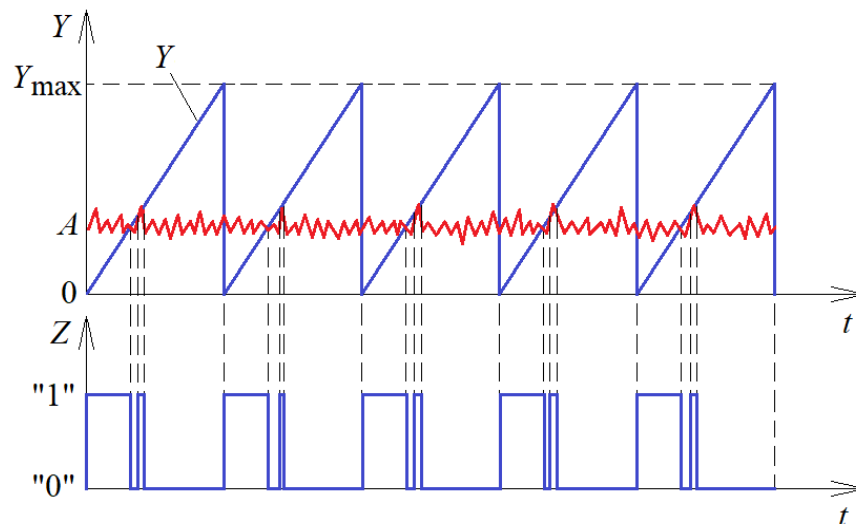


Рис.2.39. Динамічна характеристика роботи ШІМ при наявності брязкоту контакту.

З рисунку 2.39 видно, що брязкіт контакту може виникати лише в кінці імпульсу, на ділянці, де вихідний сигнал інтегратора (Y) лінійно зростає з постійною швидкістю. Це також видно із перехідного процесу, представленого на рис.2.38, де короткий імпульс (брязкіт контакту) є після довгого. А на початку імпульсу брязкоту контакту виникнути не може, оскільки в момент появи імпульсу інтегратор обнулюється і його вихідний сигнал стрибкоподібно спадає до нуля (див. рис.2.38).

Для усунення брязкоту контакту пропонується удосконалити алгоритм ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань, а саме ввести ще один компаратор для порівняння вихідного сигналу інтегратора (Y) із зміщеним сигналом завдання шпаруватості ($A - \Delta_A$). Удосконалений алгоритм ШІМ представлений на рис.2.39. Цей алгоритм виконується в межах одного скан-циклу контролера.

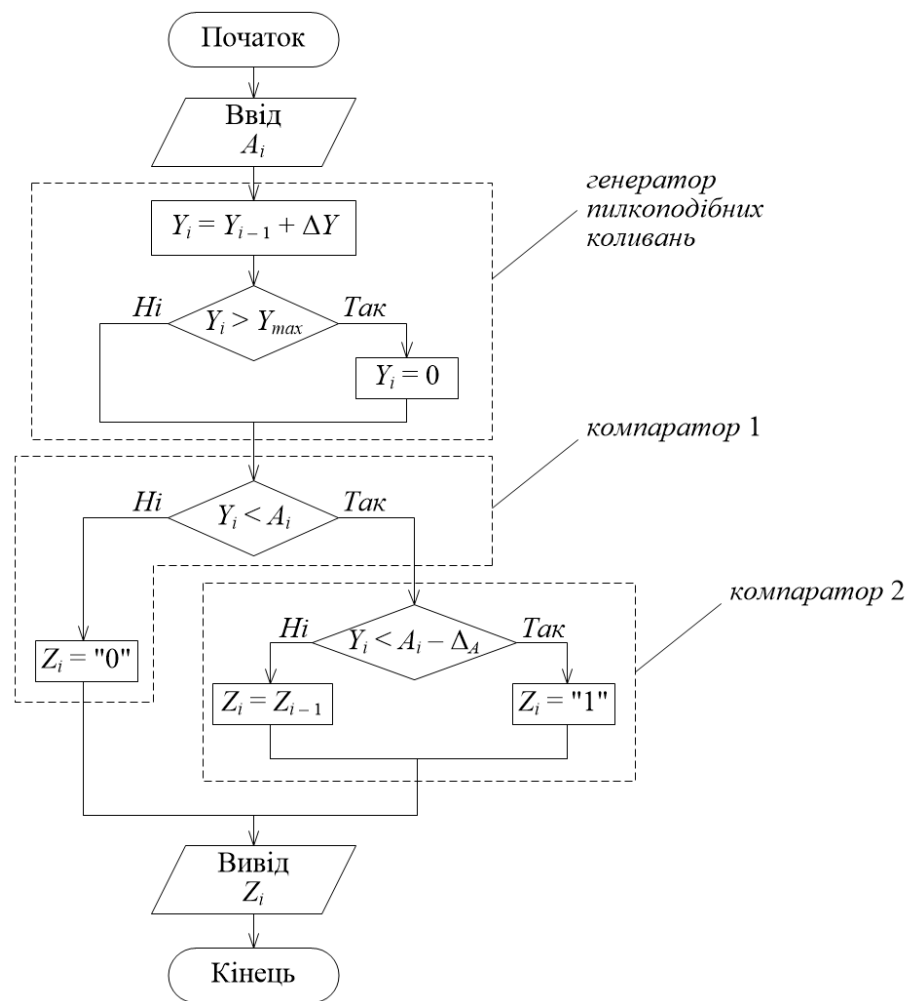
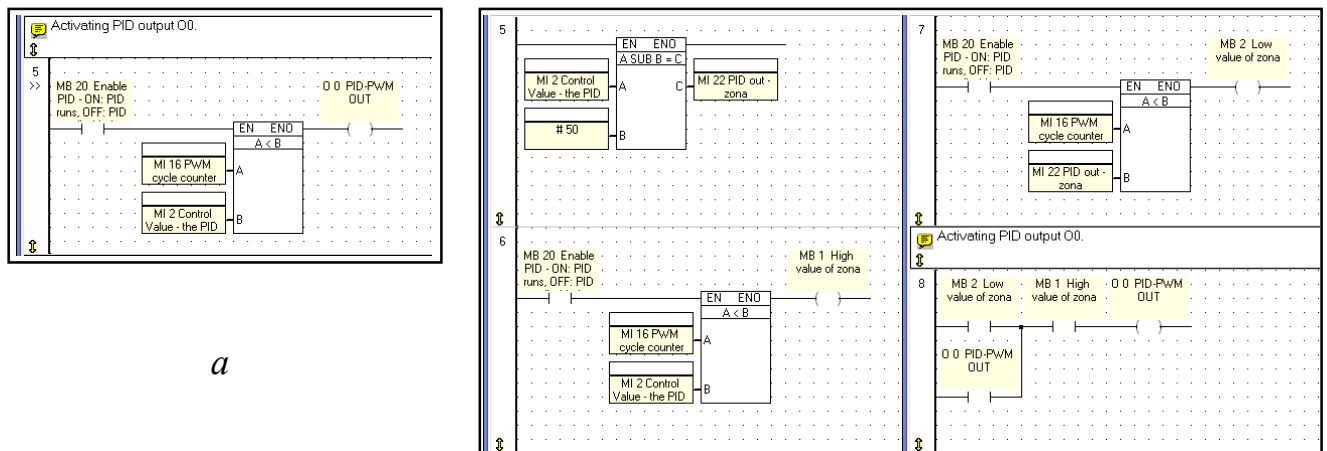


Рис.2.40. Спрощена блок-схема удосконаленого алгоритму ШІМ.

Фрагмент програми (в середовищі U90Ladder, що застосовується для програмування ПЛК Jazz) з удосконаленим алгоритмом ШІМ та зі звичайним алгоритмом ШІМ на базі генератора пилкоподібних коливань представлено на рис.2.41. Динамічна характеристика роботи ШІМ згідно удосконаленого алгоритму (без брязкоту контакту) наведена на рис.2.42.

Зареєстрований перехідний процес в САР з ПІД регулятором та удосконаленим ШІМ представлено на рис.2.43.



a

б

Рис.2.41. Фрагмент програми в середовищі U90Ladder:

a – звичайний алгоритм ШІМ; *б* – удосконалений алгоритм ШІМ.

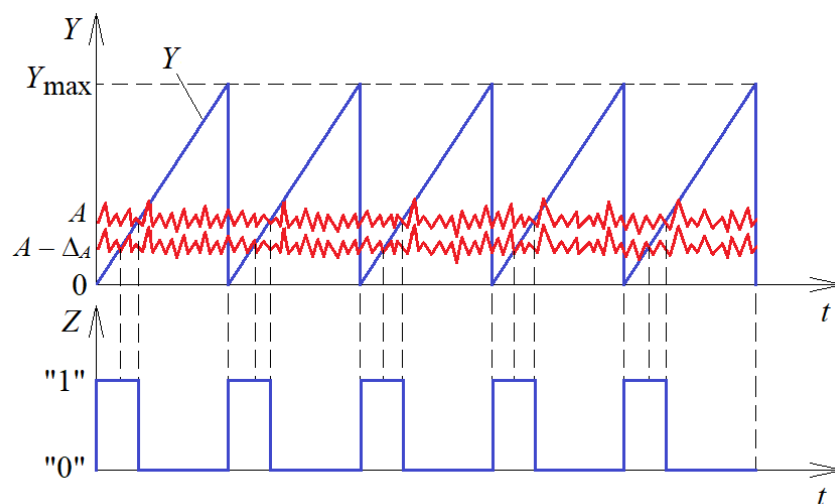


Рис.2.42. Динамічна характеристика роботи ШІМ за удосконаленим алгоритмом.

Під час спостереження за перехідним процесом, зображеним на рис.2.43, брязкіт контакту був відсутній. Це також видно на зареєстрованому тренді перехідного процесу (рис.2.43, збільшені графіки), де є лише довгі імпульси, а коротких немає.

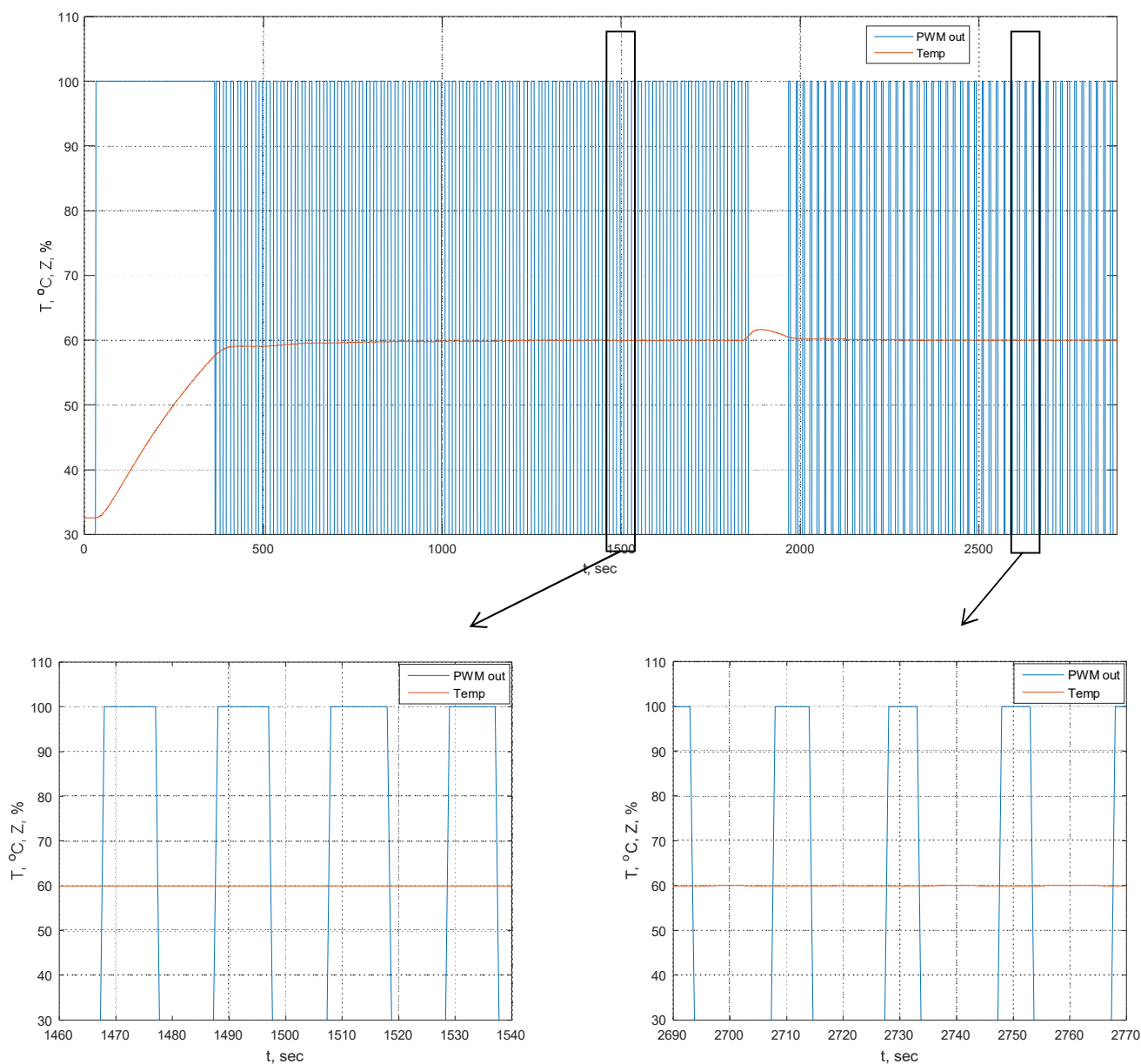


Рис.2.43. Перехідний процес в САР з ПД регулятором та ШІМ
(удосконалений алгоритм ШІМ).

Таким чином, застосувавши удосконалений алгоритм, вдалося усунути вплив коливання вхідного аналогового (оцифрованого) сигналу контролера на формування імпульсного вихідного сигналу та уникнути зайвих спрацювань вихідного релейного контакту, що є основною перевагою удосконаленого алгоритму. Удосконалений алгоритм забезпечує підвищення надійності функціонування контролера та збільшення часового ресурсу роботи вихідного релейного контакту.

2.3.3. Вибір періоду імпульсів ШІМ для керування тепловим об'єктом

На практиці часто постає завдання вибору періоду імпульсів ШІМ для керування об'єктом [138], [139]. Це завдання може бути вирішене із врахуванням динамічних властивостей об'єкта регулювання. В загальному випадку, чим більшою є інерційність об'єкта – тим довшим може бути період імпульсів на виході ШІМ. І навпаки.

Оскільки основна суть застосування ШІМ для керування тепловим об'єктом полягає у тому, що ОР поводить себе як фільтр, то період імпульсів на вході ОР (i , відповідно, їх частота) повинен бути таким, щоб вихідний сигнал ОР у стані рівноваги був рівномірним, без будь-яких коливань. А це може бути досягнуто лише у тому випадку, коли частота вхідного сигналу буде достатньо великою, щоб цей сигнал був повністю профільтрований об'єктом. Встановити числове значення частоти імпульсів (i , відповідно, їх періоду) для конкретного об'єкта можна на основі його амплітудно-частотної характеристики (АЧХ).

Розглянемо приклад застосування ШІМ для об'єкта, який досліджується у цій роботі (електрична піч). Динамічна модель даного об'єкта каналом регулювання може бути представлена у вигляді такої функції передачі [11]:

$$W_{CP}^x(s) = \frac{k_x}{(a_x s + 1)} \cdot \frac{1}{(b_x s + 1)}, \quad (2.4)$$

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

На основі функції передачі ОР (6) побудовано графік нормованої АЧХ ОР, див.рис.2.17. Нормування здійснено таким чином, щоб значення АЧХ ОР знаходились у діапазоні між 0 та 100 %. Для цього, значення АЧХ ОР були поділені на k_x і помножені на 100.

На рис.2.44 позначено точки, що відповідають частоті імпульсного вхідного сигналу ОР в стані рівноваги при застосуванні двопозиційного регулятора (точка 1) та при застосуванні ПД регулятора з ШІМ (точка 2). Співвідношення між

частотою імпульсного сигналу (f) та періодом імпульсів (τ) визначається загальновідомою залежністю:

$$f = \frac{1}{\tau}. \quad (2.5)$$

В точці 1 на рис.2.44 частота становить 0,0093 Гц, а АЧХ – 1,91 %. При такому значенні АЧХ (1,91 %) амплітуда коливань на виході ОР в стані рівноваги є суттєвою. І це підтверджує графік перехідного процесу, представлений на рис.2.37.

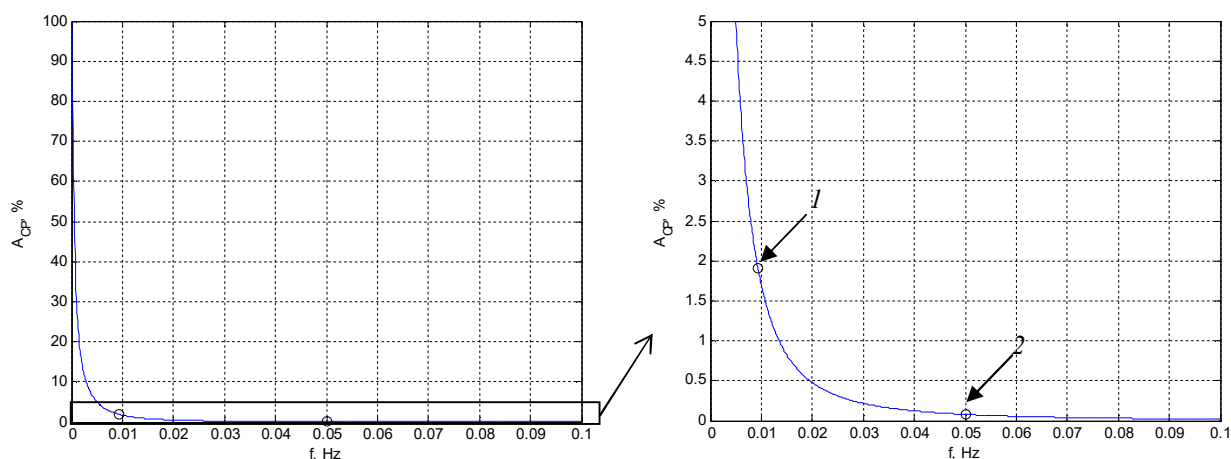


Рис.2.44. Нормована АЧХ ОР:

1 – двопозиційний регулятор; 2 – ПІД регулятор з ШІМ.

В точці 2 на рис.2.44 частота становить 0,05 Гц, а АЧХ – 0,08 %. При такому значенні АЧХ (0,08 %) коливання на виході ОР в стані рівноваги є відсутні. І це підтверджує графік перехідного процесу, представлений на рис.2.43.

Таким чином, критерієм для вибору частоти імпульсів може бути таке значення частоти, при якому нормована АЧХ ОР не перевищує 0,1 %. При цьому слід зазначити, що суттєво збільшувати частоту імпульсів не доцільно, оскільки це буде приводити до швидкого зношування релейного контакту.

2.4. Методика розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу на вході автоматичного регулятора

Фільтрування аналогового сигналу широко застосовується в сучасних автоматизованих системах вимірювання та керування. Основною метою процесу фільтрування є виділення корисного сигналу та усунення завад (шумів). Для систем керування на основі автоматичних регуляторів з імпульсним чи неперервним вихідним сигналом застосування фільтра забезпечує усунення зайвих спрацювань регулятора та покращення якості процесу регулювання.

При виборі фільтра часто постає завдання вибору структури фільтра та визначення числових значень його параметрів налаштування. Сьогодні в промислових мікропроцесорних системах автоматизації найбільш широке застосування знайшли таких два типи фільтрів: експоненціальний фільтр та фільтр ковзного середнього [140]-[149]. Структура цих фільтрів є відома, а числові значення їх параметрів налаштування можуть бути встановлені в певному діапазоні, залежно від процесу, для якого виконується вимірювання технологічного параметра.

Для експоненціального фільтра, встановлення занадто малого значення сталої часу фільтра приведе до незадовільної якості процесу фільтрування, оскільки не усі завади (шуми) будуть відфільтровані (усунені). Встановлення занадто великого значення сталої часу фільтра забезпечить високу якість фільтрування, проте приведе до значного запізнення відфільтрованого сигналу, що, у свою чергу, збільшить динамічну похибку вимірювання. Тому постає завдання визначення такої сталої часу фільтра, яка би забезпечувала задовільну якість фільтрування при незначній динамічній похибці вимірювання. Для вирішення цього завдання розроблено методику розрахунку оптимального значення сталої часу фільтра на основі інтегрального критерію, що враховує якість процесу фільтрування та динамічну похибку вимірювання.

Питання оптимізації фільтрів висвітлено в [150]-[152], проте значна увага приділена оптимізації структури фільтра і мало уваги приділено визначенню оптимальних числових значень параметрів налаштування фільтра.

2.4.1. Особливості фільтрів аналогових сигналів

В аналоговій обробці сигналів під фільтрами розуміють пристрої для виділення бажаних компонентів спектру електричного сигналу та придушення не бажаних. В цифровій обробці сигналів під цифровими фільтрами розуміють програмні чи апаратні засоби для будь-якого оброблення цифрових сигналів, які мають властивості лінійності та стаціонарності [153]-[155]. За формою амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) розрізняють 4 типи фільтрів:

- фільтри низьких частот – це фільтри, які пропускають частоти, менші за частоту зрізу фільтра f_c ;
- фільтри високих частот – це фільтри, які пропускають частоти, більші за частоту зрізу фільтра f_c ;
- смугові (смугопр пропускаючі) фільтри – це фільтри, які пропускають частоти, що належать діапазону частот від f_{c1} до f_{c2} ;
- режекторні (смугопридушуючі) фільтри – це фільтри, які пропускають частоти, що не належать діапазону частот від f_{c1} до f_{c2} .

Реалізувати ідеальну АЧХ не можливо, тому в процесі проектування фільтрів використовують різні методи апроксимації АЧХ. За функцією апроксимації АЧХ фільтрів розрізняють:

- фільтри Батерворта – головною перевагою цих фільтрів є відсутність локальних екстремумів у смузі пропускання та смузі загородження, проте вони мають повільний спад АЧХ, тому реалізувати високовибіркові фільтри складно та дорого, оскільки потрібно забезпечити високий порядок фільтра;
- фільтри Чебишева першого та другого роду – мають значно крутіший спад АЧХ, проте мають локальні екстремуми в смузі пропускання (1 роду) або в смузі загородження (2 роду);
- еліптичні фільтри (фільтри Кауера) – мають найвищу крутизну спаду АЧХ, проте мають локальні екстремуми як в смузі пропускання, так і в смузі загородження з більш низькою ефективністю придушення в ній.

Крім вищеперерахованих розрізняють ще фільтри Беселя (які мають гладку фазо-частотну характеристику), Лагранжа, Габора, Гауса тощо.

Основними перевагами цифрових фільтрів над аналоговими є:

- висока точність (в аналогових фільтрах точність обмежена допусками на елементи);
- стабільність (відсутній дрейф параметрів в залежності від умов зовнішнього середовища);
- гнучкість в налаштуванні та легкість зміни параметрів фільтрів;
- компактність.

Недоліки цифрових фільтрів у порівнянні з аналоговими:

- обмеження робочого діапазону частот частотою Найквіста (найвища частота сигналу, який може бути відновлений без спотворення після процесу дискретизації);
- проблеми з роботою в режимі реального часу, так як всі обчислення повинні закінчитися за період дискретизації;
- для високої точності фільтра потрібні АЦП та ЦАП високої розрядності.

Процес дискретної фільтрації полягає в підсумовуванні деякої кількості вхідних та попередніх вихідних відліків:

$$y_n = b_0 x_n + b_1 x_{n-1} + \dots + b_k x_{n-k} - a_1 y_{n-1} - a_2 y_{n-2} - \dots - a_m y_{n-m}, \quad (2.6)$$

де y_n – поточний відлік вихідного сигналу фільтра; x_n – поточний відлік вхідного сигналу фільтра; y_{n-1} – попередній відлік вихідного сигналу; x_{n-1} – попередній відлік вхідного сигналу; b_i – коефіцієнти вхідних відліків; a_i – коефіцієнти вихідних відліків.

В залежності від того, які відліки приймають участь у формуванні вихідного значення розрізняють:

- фільтри зі скінченною імпульсною характеристикою (finite impulse response, FIR) або нерекурсивні фільтри – для розрахунку використовуються лише вхідні відліки;
- фільтри з безкінечною імпульсною характеристикою (infinite impulse response, IIR) або рекурсивні фільтри – для розрахунку використовуються як вхідні, так і попередні вихідні відліки (такі фільтри можуть бути нестійкими).

Фільтри низької частоти, які використовуються у промисловості, ґрунтуються переважно на фільтрах двох типів – фільтр ковзного середнього значення (нерекурсивний) та експоненціальний фільтр (рекурсивний) [156].

Фільтр ковзного середнього, який використовує п'ять відліків, описується рівнянням:

$$y_n = \frac{1}{5}(x_{n-2} + x_{n-1} + x_n + x_{n+1} + x_{n+2}). \quad (2.7)$$

У цьому фільтрі використовуються значення вхідного сигналу як до заданого моменту n , так і після нього, і тому значення відфільтрованого сигналу не відстає від вхідних значень. Така форма запису алгоритму фільтрації є непричинною (non-causal). Для задач реального часу такі фільтри не підходять.

Усі значення фільтрів реального часу повинні обчислюватись на основі раніше введених даних. Тобто у довільний момент t_0 враховуються значення $t < t_0$. Вихідна послідовність відставатиме від вхідної. Такі фільтри називаються причинними (causal) і вони описуються рівнянням:

$$y_n = \frac{1}{5}(x_n + x_{n-1} + x_{n-2} + x_{n-3} + x_{n-4}). \quad (2.8)$$

Фільтр ковзного середнього значення є простим, проте за однакових коефіцієнтів фільтр стає інертним і повільно реагує на зміни вхідного сигналу.

Експоненціальний фільтр, який ще називають авторегресійним фільтром ковзного середнього значення першого порядку (autoregressive-moving-average, ARMA), описується рівнянням

$$y_n = \frac{h}{T+h}x_n + \frac{T}{T+h}y_{n-1}, \quad (2.9)$$

де h – період дискретизації аналогового сигналу; T – стала часу експоненціального фільтра.

Відфільтроване поточне значення y_n визначається сумуванням попереднього значення відфільтрованого сигналу y_{n-1} та поточного значення вхідного сигналу x_n з відповідними ваговими коефіцієнтами.

2.4.2. Експериментальне дослідження сигналів на вході автоматичного регулятора

Для оцінки впливу параметрів фільтра на якість процесу фільтрування застосовано результати експериментального дослідження сигналів на вході автоматичного регулятора. Досліджуваними сигналами були перехідні процеси у тепловому об'єкті (електрична піч). Детальний опис експериментальної установки та способу реєстрації перехідних процесів наведено у підрозділі 3.1. Вихідним параметром досліджуваного об'єкта була температура повітря на виході печі. Усього було зареєстровано п'ятнадцять кривих розгону. Період дискретизації зареєстрованих аналогових сигналів становив 1 с. Нормовані криві розгону, які були отримані у результаті експериментальних досліджень, представлені на рис.2.45.

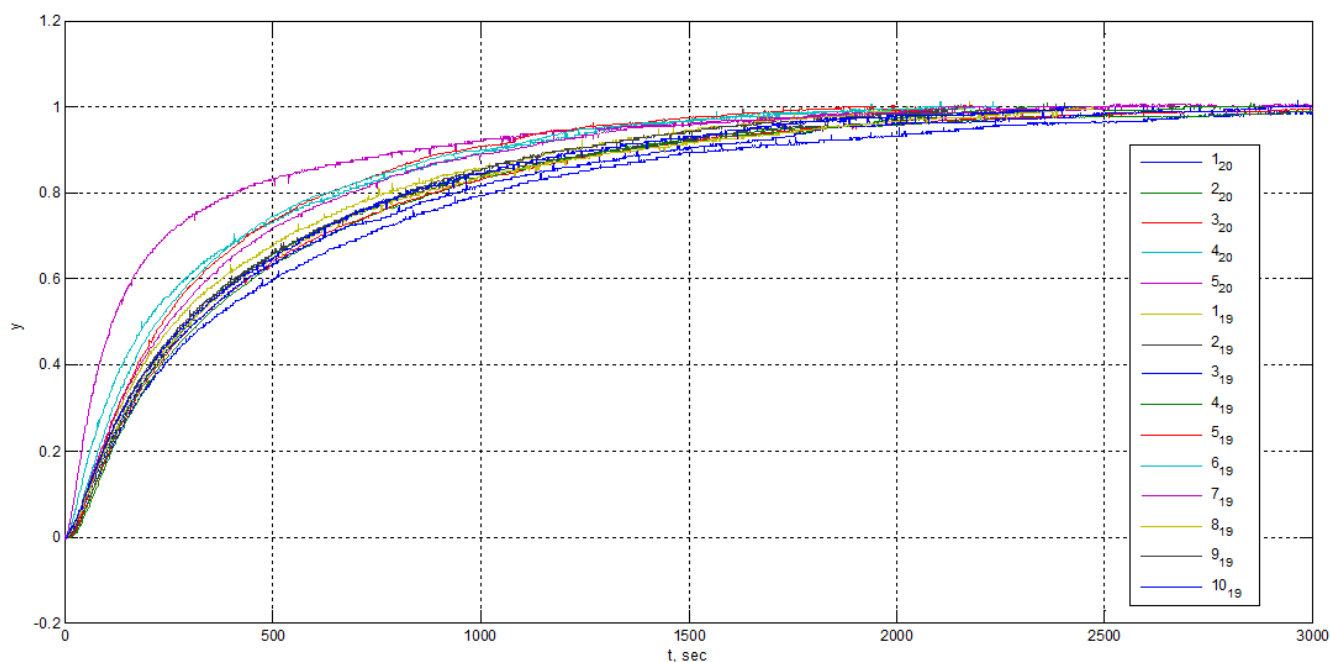


Рис.2.45. Експериментальні нормовані криві розгону.

Із рис.2.45 видно, що зареєстровані криві розгону містять не лише корисний сигнал, а й завади (шуми), які виникали під час експерименту. Ці завади мають вигляд короткочасних відхилень зареєстрованих точок від основного поточного значення сигналу. Для усунення цих завад під час роботи системи вимірювання в реальному часі пропонується застосовувати експоненціальний фільтр зі сталою часу, розрахованою відповідно до методики, наведеної нижче. Також із рис.2.45 видно, що зареєстровані криві розгону мають різну динаміку. Для розрахунку оптимального значення сталої часу фільтра вибрано криву 5_{20} (верхня фіолетова крива на рис.2.45), у якій швидкість зміни сигналу є найбільша. Це пояснюється тим, що вплив сталої часу фільтра на динамічну похибку вимірювання буде найбільш суттєвим для сигналу з найбільшою швидкістю зміни, а для сигналів з меншою швидкістю зміни цей вплив буде менш суттєвим.

2.4.3. Методика розрахунку оптимального фільтра аналогового сигналу

Розрахунок оптимального значення сталої часу експоненціального фільтра пропонується виконувати шляхом виконання таких кроків:

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

$$y_n^y = \frac{1}{5} (y_{n-2}^e + y_{n-1}^e + y_n^e + y_{n+1}^e + y_{n+2}^e), \quad (2.10)$$

де y^e – експериментальні точки.

Приклад розрахунку усередненої кривої розгону для експериментальної кривої 5_{20} представлено на рис.2.46. Для кращої наглядності крива розгону представлена у діапазоні часу від 0 до 20 с.

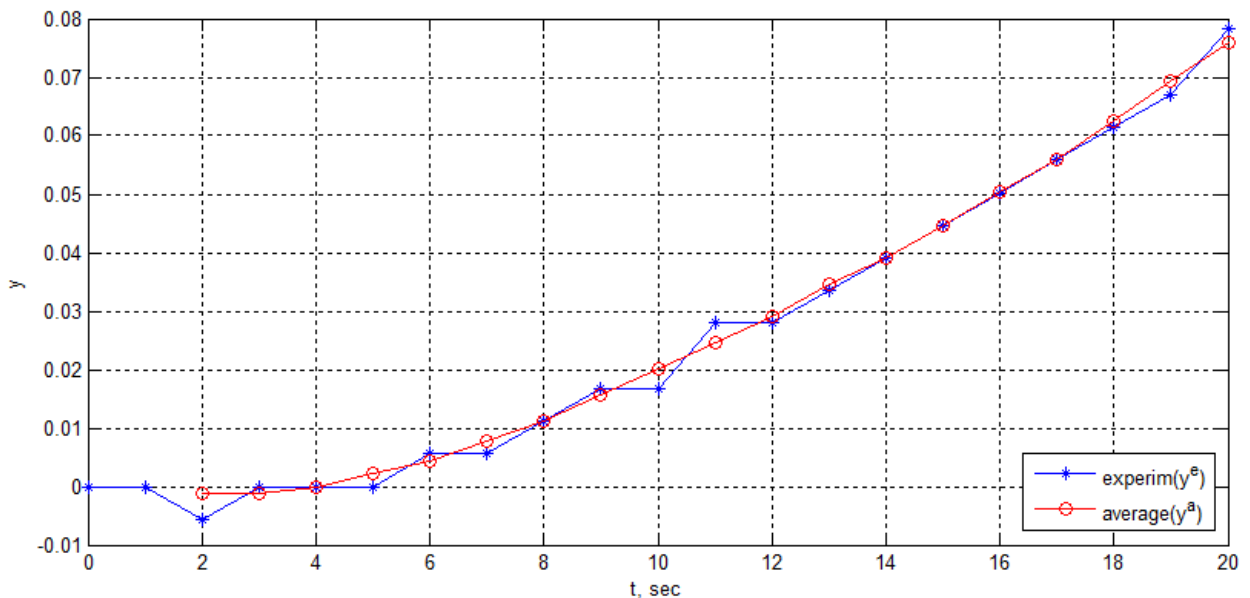


Рис.2.46. Розрахунок усередненої кривої розгону.

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

$$D = \frac{1}{N-4} \sum_{i=3}^{N-2} (y_i^e - y_{i-2}^y)^2, \quad (2.11)$$

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

У формулі (2.11) сума квадратів починається з третьої точки ($i = 3$) і закінчується третьою точкою з кінця ($N - 2$), оскільки перші дві точки та останні дві точки в усередненому сигналі є відсутні. Це пояснюється особливістю непричинного фільтра ковзного середнього. Перед знаком суми у знаменнику знаходиться ($N - 4$), що також пояснюється відсутністю перших двох та останніх двох точок усередненого сигналу.

Крок 3. Профільтрувати експериментальний аналоговий сигнал за допомогою експоненціального фільтра зі сталою часу $T_\phi = 1$ с. Приклад блок-схеми для фільтрування експериментального сигналу у середовищі SIMULINK наведено на рис.2.47. У блоці Signal 1 задано експериментальні точки зареєстрованого аналогового сигналу y^e . Блок filter реалізує експоненціальний

фільтр у вигляді аперіодичної ланки першого порядку зі сталою часу T_f . У результаті фільтрування буде отримано сигнал $y^{\phi 1}$. Порівняння експериментального та профільтованого аналогового сигналу представлено на рис.2.48.

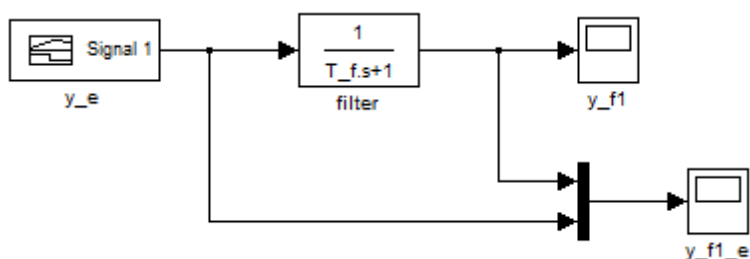


Рис.2.47. Приклад блок-схеми для фільтрування експериментального сигналу за допомогою експоненціального фільтра у середовищі SIMULINK.

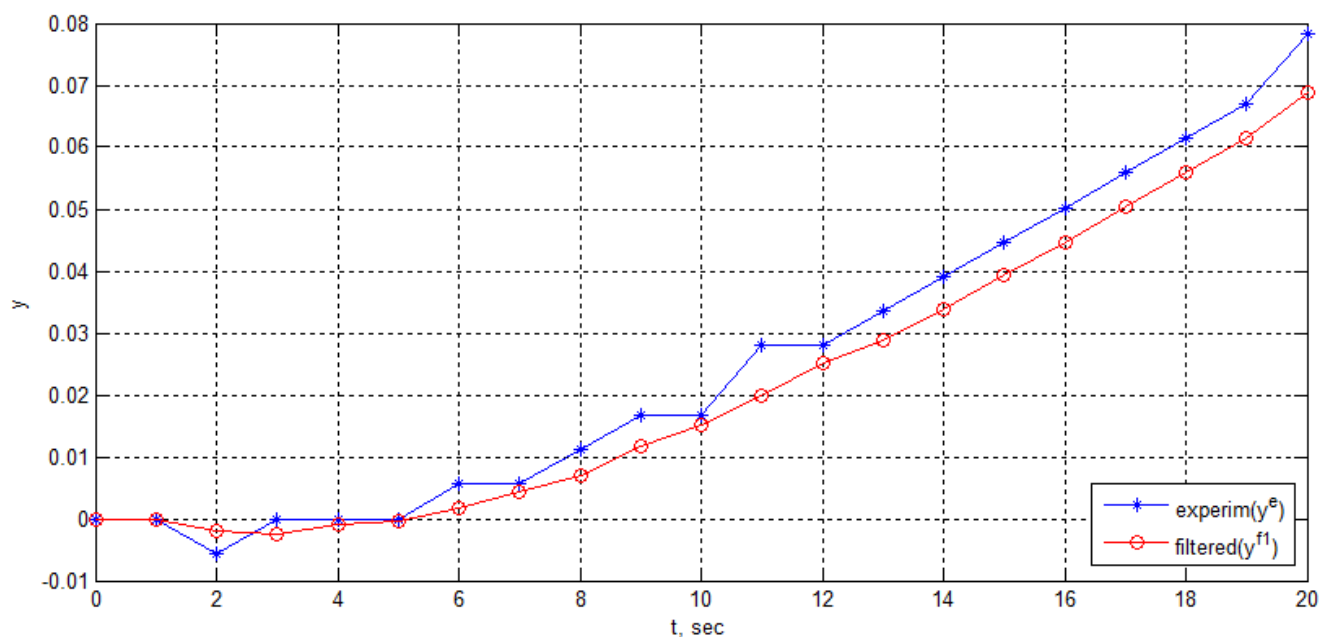


Рис.2.48. Порівняння експериментального та профільтованого аналогового сигналу за допомогою експоненціального фільтра зі сталою часу $T_\phi = 1$ с.

Крок 4. Розрахувати усереднений профільтований сигнал, застосувавши неприємний фільтр ковзного середнього згідно формули:

$$y_n^{y1} = \frac{1}{5} (y_{n-2}^{\phi 1} + y_{n-1}^{\phi 1} + y_n^{\phi 1} + y_{n+1}^{\phi 1} + y_{n+2}^{\phi 1}). \quad (2.12)$$

Порівняння профільтованого та усередненого профільтованого аналогового сигналу представлено на рис.2.49.

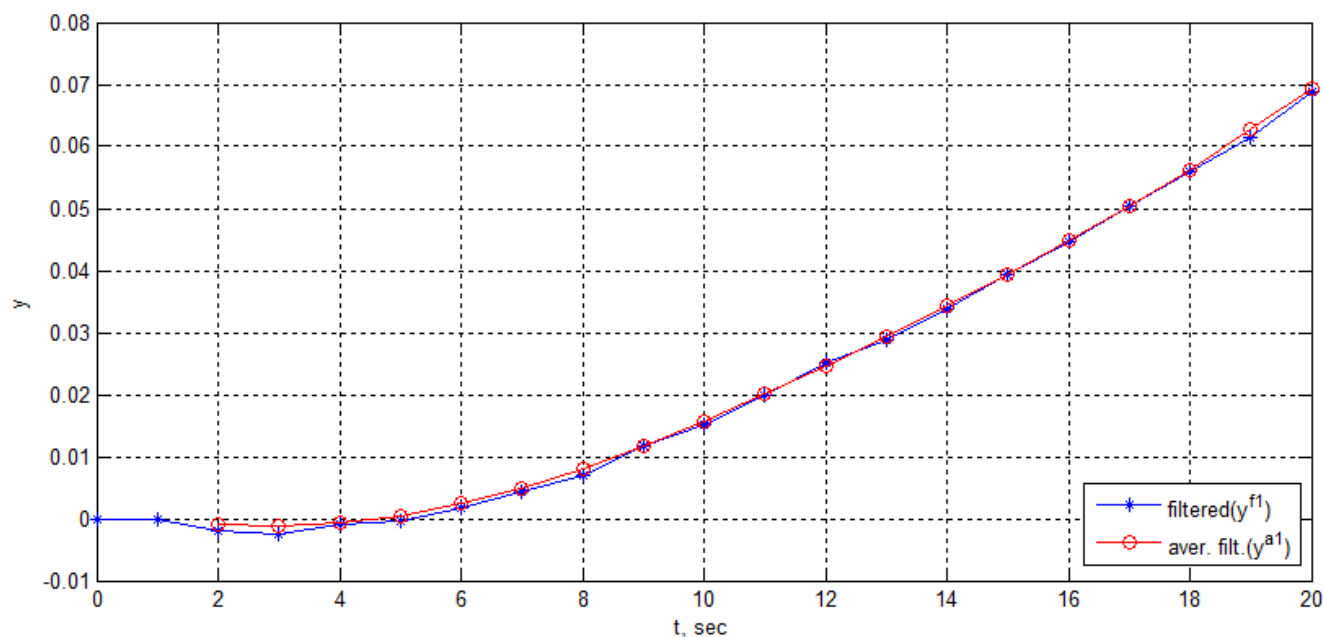


Рис.2.49. Порівняння профільтованого та усередненого профільтованого аналогового сигналу.

Крок 5. Розрахувати середнє значення квадрату відхилення профільтованих точок, отриманих на кроці 3, від усереднених профільтованих точок, отриманих на кроці 4, згідно формули

$$D = \frac{1}{N-4} \sum_{i=3}^{N-2} (y_i^{\phi 1} - y_{i-2}^{y 1})^2. \quad (2.13)$$

Крок 6. Розрахувати максимальну динамічну похибку усереднених профільтованих точок, отриманих на кроці 4, відносно усереднених експериментальних точок, отриманих на кроці 1. Оскільки нормована експериментальна крива розгону змінюється у діапазоні від 0 до 1, то максимальна відносна приведена похибка може бути розрахована за формулою

$$\delta_{\max} = \max(|y^{y 1} - y^y| \times 100). \quad (2.14)$$

Порівняння усередненого експериментального сигналу та усередненого профільтованого сигналу представлено на рис.2.50.

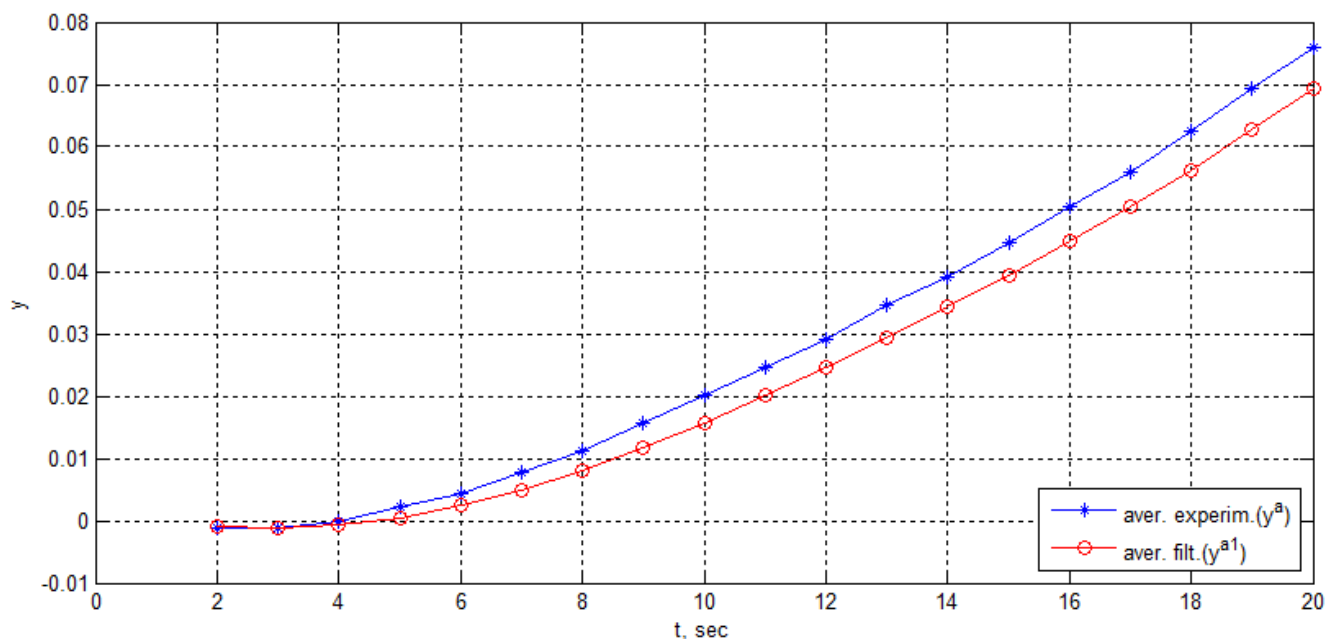


Рис.2.50. Порівняння усередненого експериментального сигналу та усередненого профільтованого сигналу.

Крок 7. Виконати кроки 3-6 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 . Ці залежності представлені у табл.2.6 та на рис.2.51,2.52 для експериментальної кривої 5_{20} .

Із табл.2.6 видно, що останнє значення сталої часу фільтра, для якого максимальна динамічна похибка не перевищує 10 % становить 18 с.

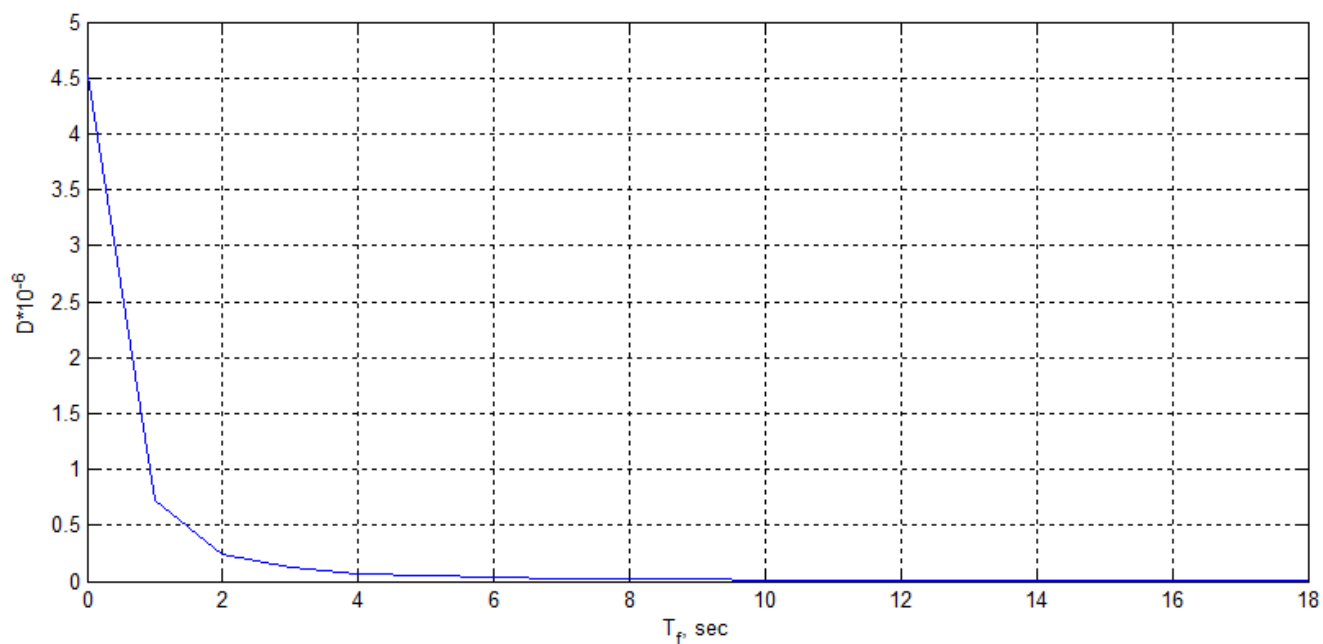
Величина D характеризує розсіювання відфільтрованого сигналу відносно усередненого відфільтрованого сигналу і може служити показником якості процесу фільтрування. Чим менше розсіювання профільтованого сигналу – тим краща якість процесу фільтрування. Як видно з рис.2.51, збільшення сталої часу фільтра приводить до зменшення середнього квадрату відхилення D , тобто до покращення якості процесу фільтрування аналогового сигналу. Проте, необхідно

звернути увагу на вплив сталої часу фільтра на динамічну похибку профільованого сигналу. Зі збільшенням сталої часу фільтра ця похибка зростає (див.рис.2.52). Для визначення оптимального значення сталої часу фільтра пропонується застосувати інтегральний критерій оптимальності, розрахунок, якого наведено у наступному пункті.

Таблиця 2.6

Залежність середнього квадрату відхилення D та максимальної динамічної похибки δ_{\max} від сталої часу фільтра T_{ϕ} .

T_{ϕ} , с	$D \times 10^{-6}$	δ_{\max} , %	T_{ϕ} , с	$D \times 10^{-6}$	δ_{\max} , %	T_{ϕ} , с	$D \times 10^{-6}$	δ_{\max} , %	T_{ϕ} , с	$D \times 10^{-6}$	δ_{\max} , %
0	4,528	0,00	5	0,046	3,18	10	0,012	5,95	15	0,006	8,29
1	0,720	0,67	6	0,033	3,76	11	0,010	6,45	16	0,005	8,71
2	0,240	1,33	7	0,024	4,34	12	0,009	6,94	17	0,005	9,14
3	0,118	1,96	8	0,019	4,90	13	0,008	7,41	18	0,004	9,57
4	0,070	2,59	9	0,015	5,44	14	0,007	7,86	19	0,004	10,01

Рис.2.51. Залежність середнього квадрату відхилення D від сталої часу фільтра T_{ϕ} .

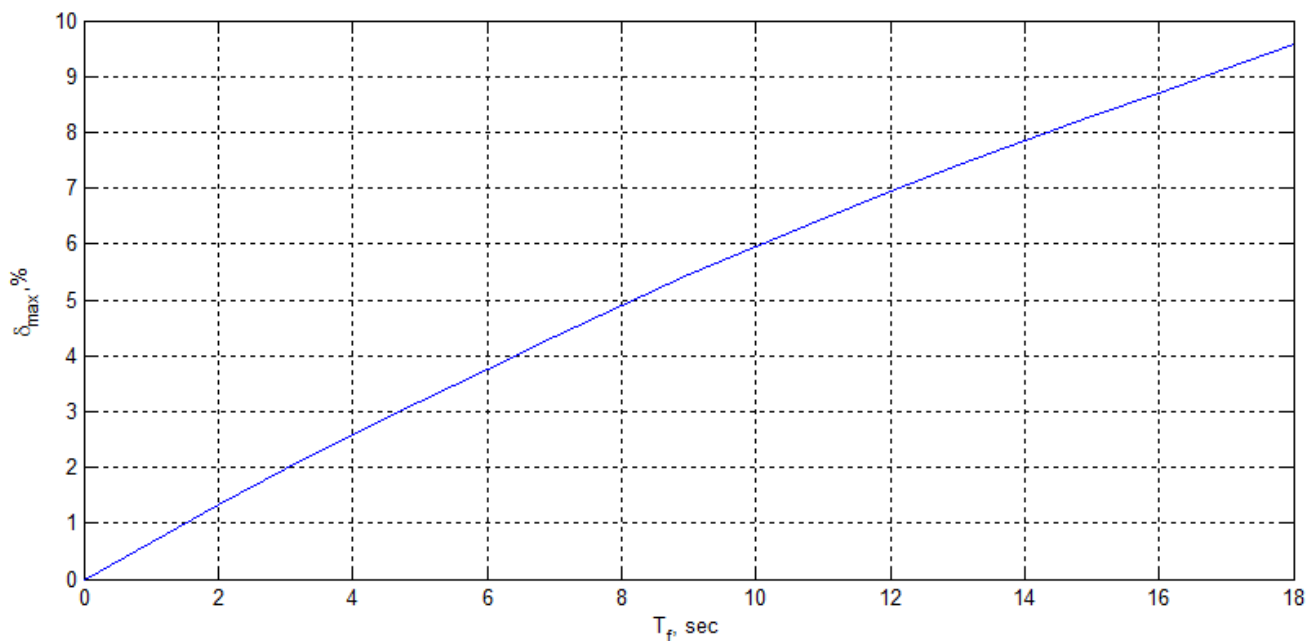


Рис.2.52. Залежність максимальної динамічної похибки δ_{\max} від сталої часу фільтра T_ϕ .

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

$$I(T_\phi) = D'(T_\phi) + \delta'_{\max}(T_\phi), \quad (2.15)$$

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

Приведені значення середнього квадрату відхилення розраховуються згідно формули

$$D'(T_\phi) = \frac{D(T_\phi)}{D(0)}, \quad (2.16)$$

де $D(0)$ – перше значення середнього квадрату відхилення (для сталої часу фільтра $T_\phi = 0$ с).

Приведені значення максимальної динамічної похибки розраховуються згідно формули

$$\delta'_{\max}(T_{\phi}) = \frac{\delta_{\max}(T_{\phi})}{\delta_{\max}(n)}, \quad (2.17)$$

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:

$$T_{\phi} = T_{\phi}^{opt} \Big|_{I=\min(I)}. \quad (2.18)$$

Залежність інтегрального критерію оптимальності I від сталої часу фільтра T_{ϕ} для експериментальної кривої 5_{20} представлена на рис.2.53.

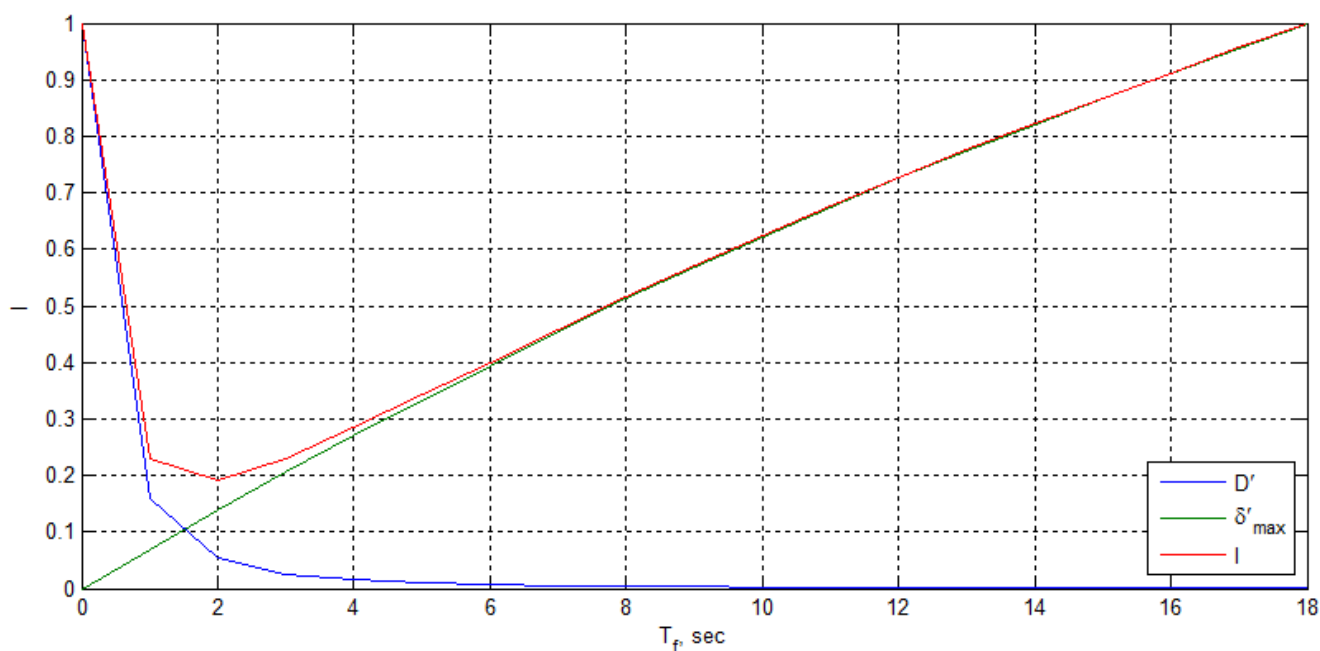


Рис.2.53. Залежність інтегрального критерію оптимальності I від сталої часу фільтра T_{ϕ} .

Із рис.2.53 видно, що оптимальне значення сталої часу фільтра, для якого інтегральний критерій оптимальності приймає мінімальне значення, становить 2 с. При такому значенні сталої часу фільтра максимальна динамічна похибка

профільтрованого сигналу є незначною і становить 1,33 % (див. табл.2.6). При цьому вплив завад (шумів) на корисний сигнал після фільтрування зменшується майже в 20 разів ($4,528/0,240$, див. табл.2.6). Порівняння експериментальної кривої розгону та профільшованої кривої за допомогою фільтра з оптимальною сталою часу $T_{\phi}^{opt} = 2$ с представлено на рис.2.54.

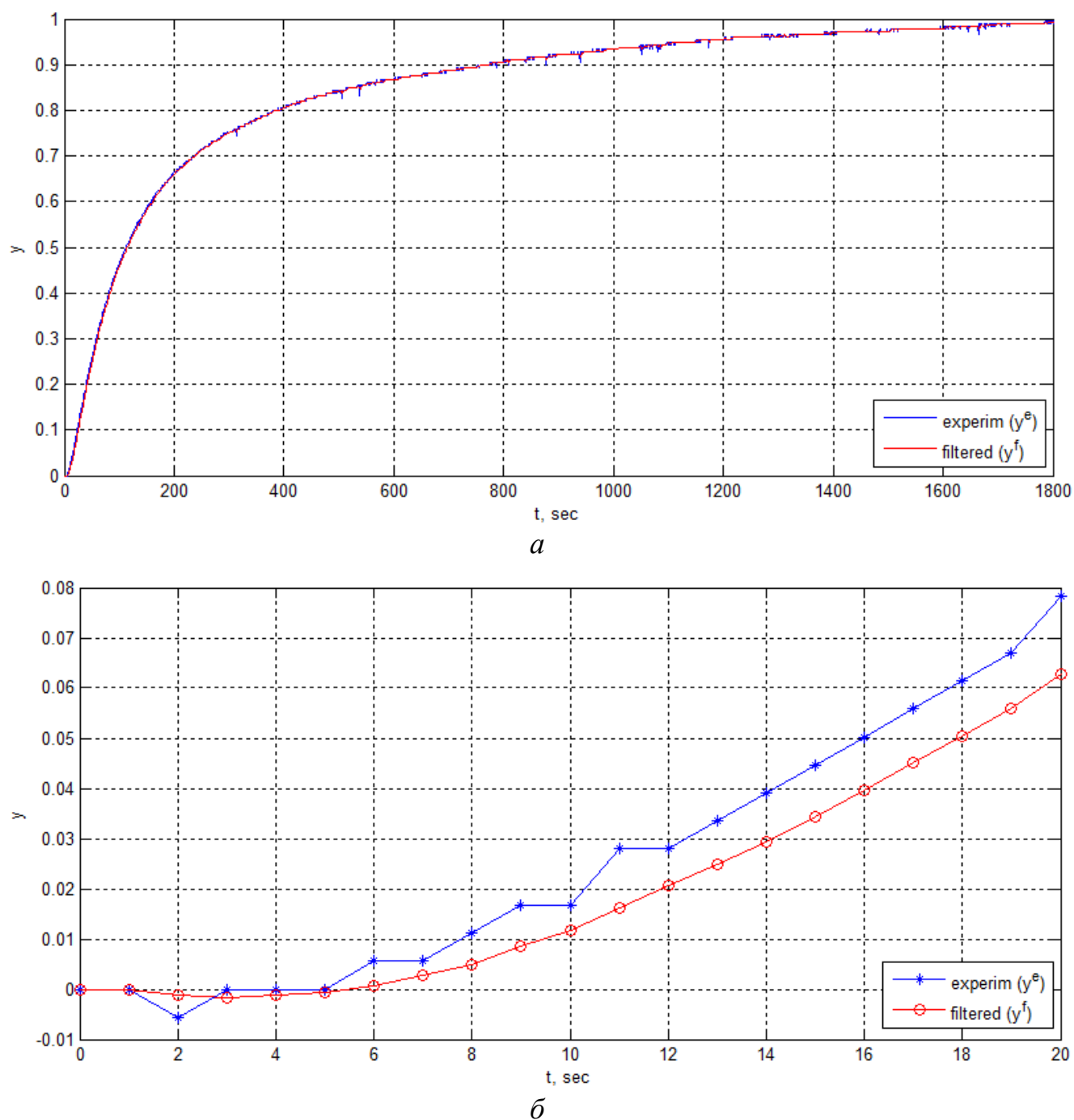


Рис.2.54. Порівняння експериментальної кривої розгону та профільшованої кривої за допомогою фільтра з оптимальною сталою часу $T_{\phi}^{opt} = 2$ с
(a – уся крива; b – фрагмент кривої у діапазоні часу 0 ... 20 с).

З рис.2.54 видно, що профільтований сигнал практично співпадає з експериментальним (рис.2.54,*a*), що свідчить про незначну динамічну похибку профільтованого сигналу. Також видно, що профільтований сигнал змінюється плавно без різких відхилень (рис.2.54,*б*), що свідчить про високу якість фільтрування.

Якщо би було поставлене завдання ще більше зменшити вплив завад (шумів) на корисний сигнал, наприклад в 100 разів, то в такому випадку часу фільтра необхідно було би збільшити до значення 5 с (див. табл.2.6). Але при цьому максимальна динамічна похибка профільтованого сигналу зросте до 3,18 %. Ще одним варіантом завдання може бути визначення такого значення сталої часу фільтра, при якому максимальна динамічна похибка не перевищує заданого значення, наприклад 3 %. В цьому випадку необхідно встановити значення сталої часу рівним 4 с.

Висновки до розділу 2

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).

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 ПІД регулятором та ШІМ може виникати зайве високочастотне 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 із зміщеним сигналом завдання шпаруватості.

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.

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 неприємного 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 %. Отримане оптимальне значення сталої часу рекомендується встановити для фільтрування вхідного аналогового сигналу в автоматизованій системі керування тепловим об'єктом.

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.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ СТВОРЕННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ НА ОСНОВІ ІМПУЛЬСНИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Об'єкти керування з нелінійними статичними та динамічними характеристиками часто зустрічаються в різних галузях промисловості, зокрема і в тепловій енергетиці. Основними причинами нелінійності є особливості тепло-масо-обмінних чи гідро-газодинамічних процесів, які відбуваються у цих об'єктах. Дослідження нелінійних об'єктів є важливим етапом на шляху до створення систем керування такими об'єктами та розробки відповідних алгоритмів управління з метою підвищення ефективності, продуктивності та надійності їх роботи.

Важливим етапом дослідження нелінійного об'єкта регулювання є побудова його математичної моделі, оскільки це дає можливість визначати поведінку об'єкта при дії на нього збурень різного типу та різної величини шляхом моделювання без необхідності проведення додаткових експериментальних досліджень. Наявність математичної моделі об'єкта також дає можливість вибрати структуру автоматичного регулятора та виконати розрахунок його параметрів налаштування для забезпечення необхідної якості перехідних процесів у замкнутій системі автоматичного регулювання.

Побудувати математичну модель об'єкта регулювання можна двома способами [157]-[161]:

- теоретичний спосіб (виведення диференціальних рівнянь на основі законів збереження енергії та маси);
- експериментальний спосіб (на основі зареєстрованих перехідних процесів для відомих вхідних збурень).

Метою цього розділу роботи є побудова математичних моделей нелінійних об'єктів регулювання на основі отриманих експериментальних даних, а також аналіз ефективності роботи нелінійних теплогенеруючих об'єктів із врахуванням похибок обліку енергоносіїв.

3.1. Дослідження нелінійного теплового об'єкта регулювання

Нелінійні теплові об'єкти застосовуються у різних виробництвах хімічної, харчової та фармацевтичної промисловості для термічної обробки, нагріву, сушіння, стерилізації та інших технологічних операцій. Широкого розповсюдження набули теплові об'єкти у вигляді електричних нагрівачів та печей, що зумовлене наявністю таких переваг як компактність, зручність застосування та маневреність. Разом із перевагами теплові об'єкти мають певні недоліки. Одним із недоліків є нелінійність їх динамічних та статичних характеристик. Для врахування нелінійності та покращення якості автоматичного керування тепловим об'єктом необхідно мати його математичну модель, яка дозволить дослідити поведінку об'єкта для різних збурень та у різних режимах роботи. Отриманню такої моделі теплового об'єкта власне і присвячений даний підрозділ роботи.

3.1.1. Експериментальне дослідження теплового об'єкта

Експериментальна установка для дослідження теплового об'єкта складалася з лабораторної електричної печі СУОЛ-0,15.2/12М, через яку продувалося повітря за допомогою вентилятора ВК-2 (див.рис.3.1). У піч був встановлений термоперетворювач опору (Pt100) виробництва фірми "Техприлад", який за трьох-провідною схемою був під'єднаний до мікропроцесорного програмованого логічного контролера МК-51Н компанії МІКРОЛ. Вихідний сигнал термоперетворювача опору реєструвався за допомогою персонального комп'ютера із застосування програмного пакету МК-реєстратор 1.1.14. Електрична потужність на вході печі змінювалася за допомогою лабораторного автотрансформатора (РНО-250-2), осердя якого переміщувалося за допомогою електричного виконавчого механізму із давачем положення (КДУ-1). Положення електричного виконавчого механізму визначалося на основі вказівника положення (ДУП-К).

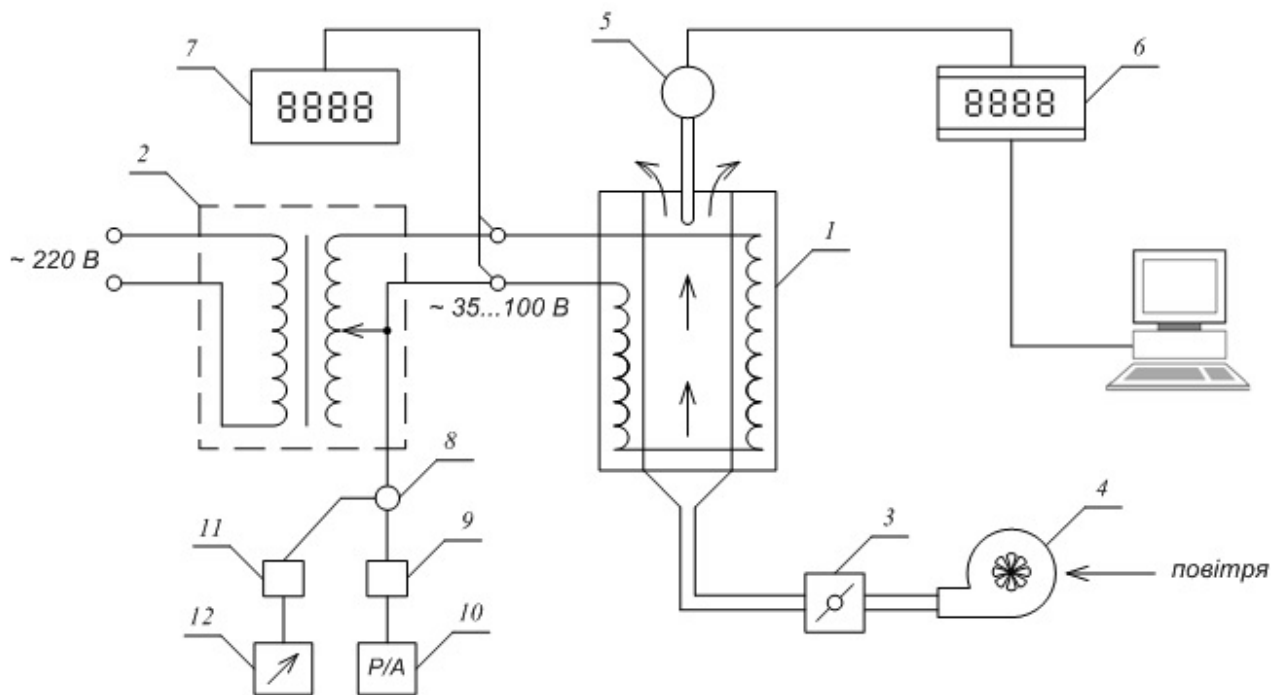


Рис.3.1. Схема експериментальної установки:

1 – електрична піч; 2 – лабораторний автотрансформатор; 3 – заслінка;
 4 – вентилятор з електродвигуном; 5 – термоперетворювач опору;
 6 – програмовано-логічний контролер; 7 – вольтметр; 8 – електричний виконавчий механізм; 9 – пусковий пристрій; 10 – блок ручного управління; 11 – датчик положення виконавчого механізму; 12 – вказівник положення виконавчого механізму.

У даному об'єкті регулювання (ОР) вихідною величиною є температура (θ), яку вимірює термоперетворювач опору, входною величиною є положення осердя лабораторного автотрансформатора (μ_W), який змінює електричну потужність на вході печі. Цей входний сигнал і був регулюючою дією. А збуренням є положення заслінки на лінії подачі повітря через піч (μ_Z), вона встановлена на виході вентилятора. Структурна схема взаємозв'язку параметрів об'єкта представлена на рис.3.2.

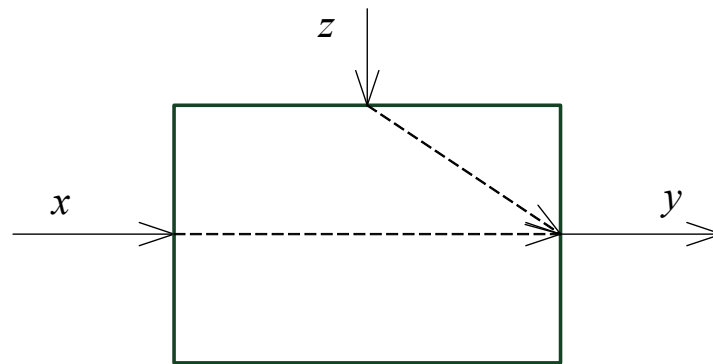


Рис.3.2. Структурна схема взаємозв'язку параметрів об'єкта регулювання:

x – вхідна величина (μ_W), y – вихідна величина (θ), z – збурення (μ_Z).

Під час виконання експериментальних досліджень було зареєстровано п'ятнадцять кривих розгону, з яких тринадцять – каналом регулюючої дії (змінною електричної потужності на вході печі) і дві – каналом збурення витратою повітря через піч (змінною положення заслінки на виході вентилятора).

У першій частині експерименту було зареєстровано десять кривих розгону при нанесенні стрибкоподібних збурень каналом регулюючої дії. Збурення були нанесені у діапазоні від 5 % до 100 % з кроком 20 % шляхом збільшення (хід “вгору”) та зменшення (хід “вниз”) електричної потужності. Для кожного рівноважного стану зафіксовано положення осердя лабораторного автотрансформатора (μ_W) та напругу на його виході (U). Дослідження виконано в околі номінальних значень параметрів теплового об'єкта. Зареєстровані точки перехідних процесів були перенесені у програмне середовище MATLAB, за допомогою якого було побудовано графіки перехідних процесів (див.рис.3.3).

У другій частині експерименту було знято п'ять кривих розгону – три з них каналом регулюючої дії з більшим кроком зміни положення осердя лабораторного автотрансформатора (криві 1...3 на рис.3.4) та дві криві розгону каналом збурення змінною витрати повітря через піч (криві 4,5 на рис.3.4).

Значення вихідної величини об'єкта регулювання у стані рівноваги (експериментальні точки статичної характеристики) для каналу регулювання представлені у табл.3.1, а для каналу збурення – у табл.3.2.

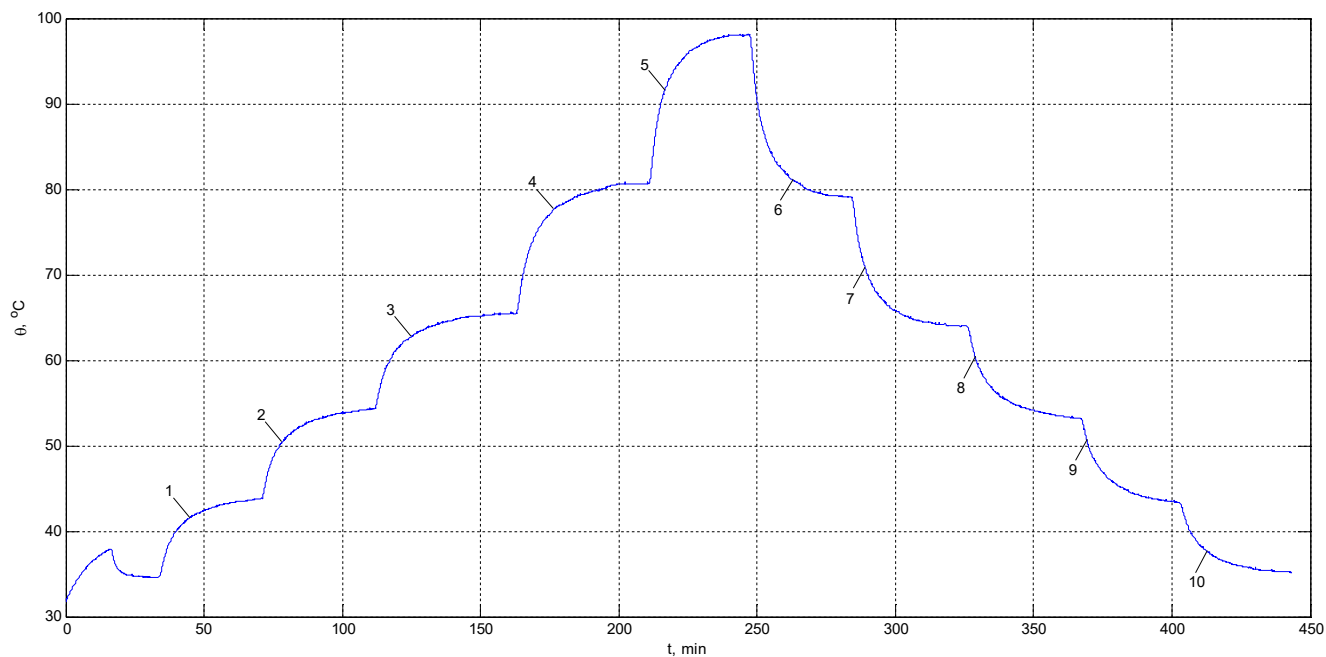


Рис.3.3. Криві розгону каналом регулюючої дії

(θ – температура, °C; t – час, хв).

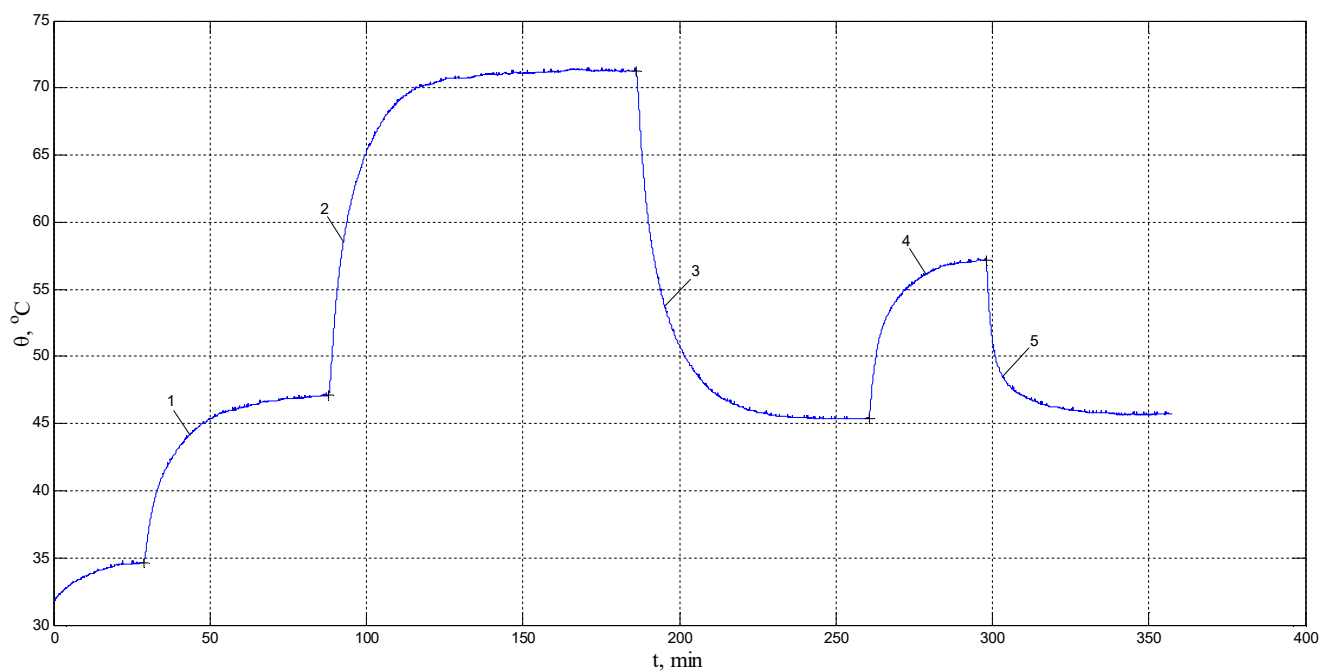


Рис.3.4. Криві розгону каналом регулюючої дії та каналом збурення

(θ – температура, °C; t – час, хв).

Таблиця 3.1

Експериментальні точки статичної характеристики
для каналу регулювання

$\mu_W, \%$	$U, В$	$\theta, ^\circ\text{C}$
Перша частина експерименту, $\mu_Z = 100 \%$		
5	35,8	34,60
20	50,5	43,73
40	63,4	54,26
60,5	74,8	65,41
81	87,3	80,62
100	98,9	98,01
80,5	85,8	79,06
59,5	72,7	63,93
39,5	61	53,16
20	48,5	43,34
5	36,4	35,15
Друга частина експерименту, $\mu_Z = 100 \%$		
5	35,5	34,6
26	54,0	47,0
71	80,5	71,2
24	51,0	45,3

Таблиця 3.2

Експериментальні точки статичної характеристики
для каналу збурення

$\mu_Z, \%$	$\theta, ^\circ\text{C}$
$\mu_W = 24 \%$	
100	45,3
50	57,1
100	45,7

З отриманих експериментальних даних видно, що збільшення μ_W приводить до зростання температури в електричній печі, а зменшення – навпаки, до спадання температури. Зменшення положення заслінки на лінії подачі повітря у піч приводить до зростання температури (крива нагріву 4 на рис.3.4), а збільшення положення заслінки – до спадання температури (крива охолодження 5 на рис.3.4).

3.1.2. Побудова математичної моделі теплового об'єкта

Отримані експериментальні дані стали основою для побудови математичної моделі об'єкта, яка складається з двох частин: статична модель та динамічна модель. Статична модель об'єкта регулювання складається з рівнянь статичної характеристики для каналу регулювання та каналу збурення, а динамічна – з функцій передачі та диференціальних рівнянь для каналу регулювання та каналу збурення.

Статична модель

Рівняння статичної характеристики об'єкта регулювання показує залежність вихідної величини від вхідної в стані рівноваги [120]. Виведення рівнянь статичної характеристики каналом регулювання та каналом збурення базується на основі отриманих експериментальних точок статичної характеристики (Табл.3.1, Табл.3.2).

На основі експериментальних точок було побудовано рівняння статичної характеристики об'єкта регулювання по каналу регулювання у вигляді лінійного рівняння:

$$\theta = 0,5446 \cdot \mu_W + 32,5359. \quad (3.1)$$

Для каналу збурення рівняння статичної характеристики також має вигляд лінійного рівняння:

$$\theta = -0,2320 \cdot \mu_Z + 68,7000. \quad (3.2)$$

Порівняння експериментальних та розрахованих точок статичної характеристики для каналу регулювання та каналу збурення у графічній формі представлено на рис.3.5 та рис.3.6.

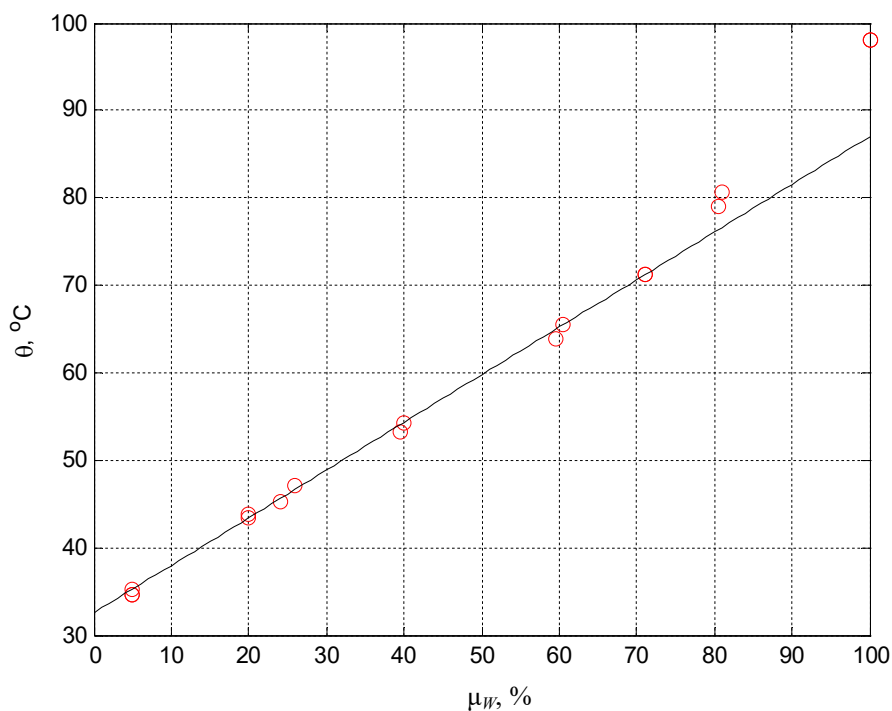


Рис.3.5. Графік статичної характеристики для каналу регулювання (○ – експериментальні точки; — – розраховані на основі рівняння (3.1)).

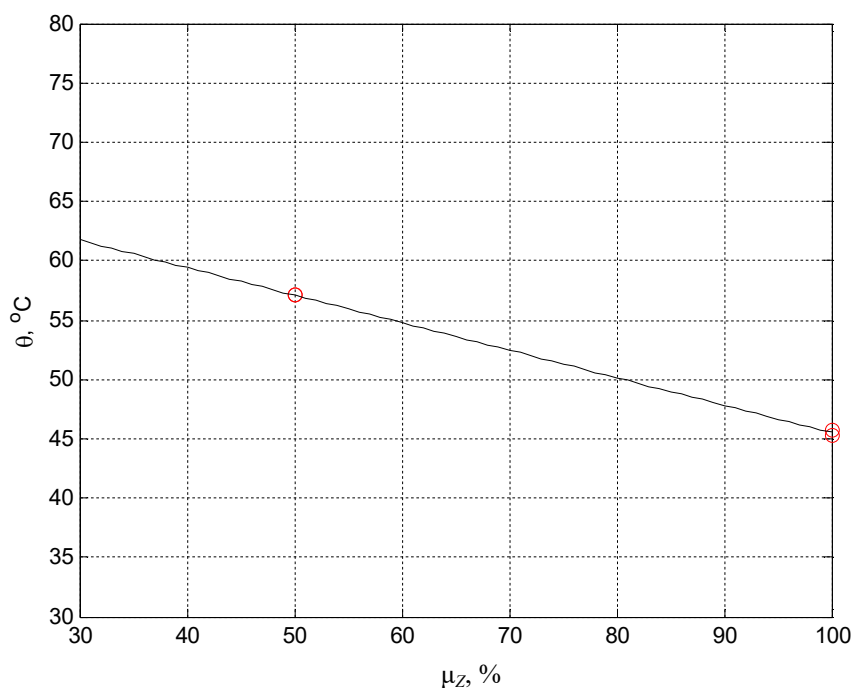


Рис. 3.6. Графік статичної характеристики для каналу збурення (○ – експериментальні точки; — – розраховані на основі рівняння (3.2)).

Абсолютні та відносні похибки розрахованих значень статичної характеристики для каналу регулювання та каналу збурення представлені у Табл.3.3 і Табл.3.4. У цих таблицях зроблено такі позначення: Δ – абсолютна похибка розрахованих точок

відносно експериментальних ($\theta_{розр} - \theta_{експ}$); δ – відносна похибка розрахованих точок відносно експериментальних $(\theta_{розр} - \theta_{експ}) / \theta_{експ} \cdot 100\%$.

Таблиця 3.3

Порівняння розрахованих і експериментальних значень точок статичної характеристики для каналу регулювання

$\mu_{ш}, \%$	$\theta_{експ}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{розр}, ^\circ\text{C}$	$\Delta, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
Перша частина експерименту, $\mu_Z = 100 \%$				
5	34,60	35,26	0,66	1,91
20	43,73	43,43	-0,30	-0,69
40	54,26	54,32	0,06	0,11
60,5	65,41	65,48	0,07	0,11
81	80,62	76,65	-3,97	-4,92
100	98,01	87,00	-11,01	-11,23
80,5	79,06	76,38	-2,68	-3,39
59,5	63,93	64,94	1,01	1,58
39,5	53,16	54,05	0,89	1,67
20	43,34	43,43	0,09	0,21
5	35,15	35,26	0,11	0,31
Друга частина експерименту, $\mu_Z = 100 \%$				
5	34,6	35,26	0,66	1,91
26	47,0	46,70	-0,30	-0,64
71	71,2	71,20	0	0
24	45,3	45,61	0,31	0,68

Таблиця 3.4

Порівняння розрахованих і експериментальних значень точок статичної характеристики для каналу збурення

$\mu_{ш}, \%$	$\theta_{експ}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{розр}, ^\circ\text{C}$	$\Delta, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
$\mu_Z = 24 \%$				
100	45,3	45,5	0,2	0,44
50	57,1	57,1	0	0
100	45,7	45,5	-0,2	-0,44

Із отриманих результатів видно, що максимальна відносна похибка розрахованих значень статичної характеристики для каналу регулювання (рівняння

(3.1)) не перевищує 5% у діапазоні μ_W від 5 до 80 % при $\mu_Z=100\%$. Для збурення (рівняння (3.2)) максимальна відносна похибка не перевищує 0,5 % у діапазоні μ_Z від 50 до 100 % при $\mu_W=24\%$. При зменшенні ступеня відкриття заслінки μ_Z , статична характеристика для каналу регулювання $\theta=f(\mu_W)$ буде зміщена вгору. При зменшенні електричної потужності на вході ОР зміною μ_W статична характеристика для каналу збурення $\theta=f(\mu_Z)$ буде зміщено вниз.

Динамічна модель об'єкта для каналу регулювання

Для побудови динамічної моделі об'єкта регулювання каналом регулювання було прийнято за основу дві експериментальні криві розгону – нагріву та охолодження (крива 2 та крива 3 на рис.3.4). Нормовані криві нагріву та охолодження представлені на рис.3.7.

На динаміку перехідних процесів впливає інерційність власне електричної печі, а також інерційність термоперетворювача. Тому, даний об'єкт може бути описаний у вигляді аперіодичної ланки другого порядку.

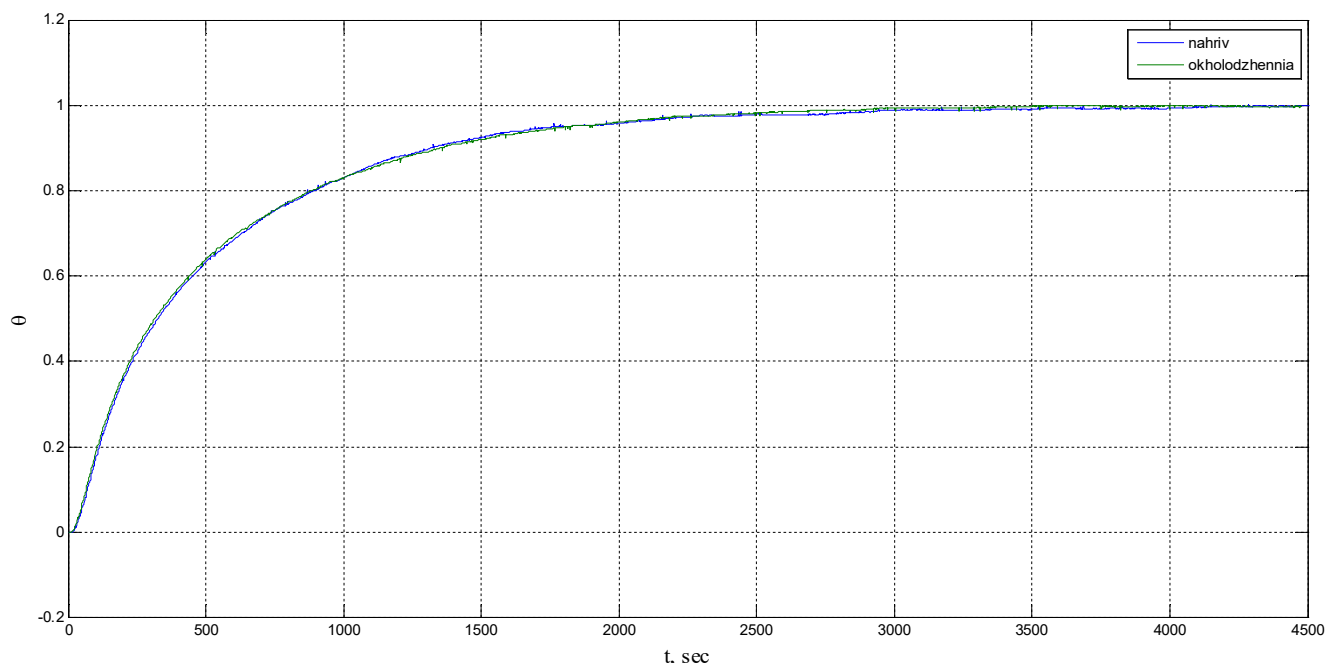


Рис.3.7. Нормовані експериментальні криві розгону (нагрів та охолодження) для каналу регулювання.

З графіка на рис.3.7 видно, що криві нагріву і охолодження практично накладаються, тобто динаміка при нагріві та при охолодженні є однаковою. Також видно, що на кривих розгону є точка перегину. Оскільки об'єкт регулювання є

двоємнісним, то для побудови теоретичної кривої розгону було прийнято за основу функцію передачі аперіодичної ланки другого порядку у такому вигляді:

$$W_{OP}^x(p) = \frac{k_x}{T_{2x}^2 p^2 + T_{1x} p + 1}, \quad (3.3)$$

де k_x – коефіцієнт передачі об'єкта каналом регулювання; T_{1x} , T_{2x} – сталі часу об'єкта каналом регулювання.

Усереднену експериментальну криву нагріву та охолодження було наближено теоретичною для трьох способів визначення сталих часу T_{1x} і T_{2x} , а саме: чисельним, графоаналітичним та комбінованим. Графіки теоретичних та експериментальних кривих розгону каналом регулювання для різних способів наближення представлені на рис. 3.8-3.10.

Суть чисельного способу визначення сталих часу полягає у застосуванні команди “fminsearch” програмного пакету MATLAB [162]. Команда “fminsearch” здійснює пошук мінімального значення багатопараметричної цільової функції із застосуванням симплексного методу Нелдера-Міда. У нашому випадку цільовою функцією є сума квадратів відхилень теоретичної кривої розгону від експериментальної, а параметрами, які визначала команда “fminsearch”, були сталі часу T_{1x} і T_{2x} .

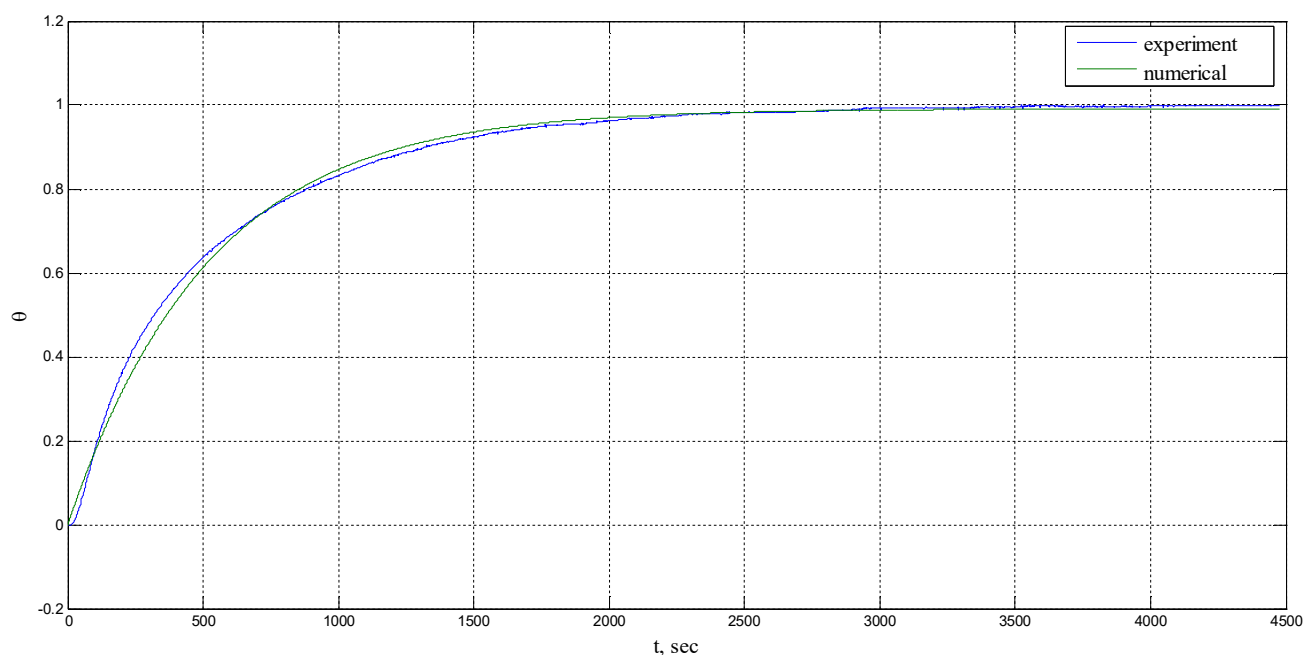


Рис.3.8. Експериментальна та теоретична криві розгону (чисельний спосіб наближення).

Суть графоаналітичного способу полягає у визначенні точки перегину на кривій розгону та побудові дотичної у цій точці. На основі довжин певних відрізків та площі, яку відтинає крива розгону від асимптоти, визначаються числові значення двох сталих часу аперіодичної ланки другого порядку. Графоаналітичний спосіб визначення сталих часу на основі кривих розгону описаний у [163]-[165].

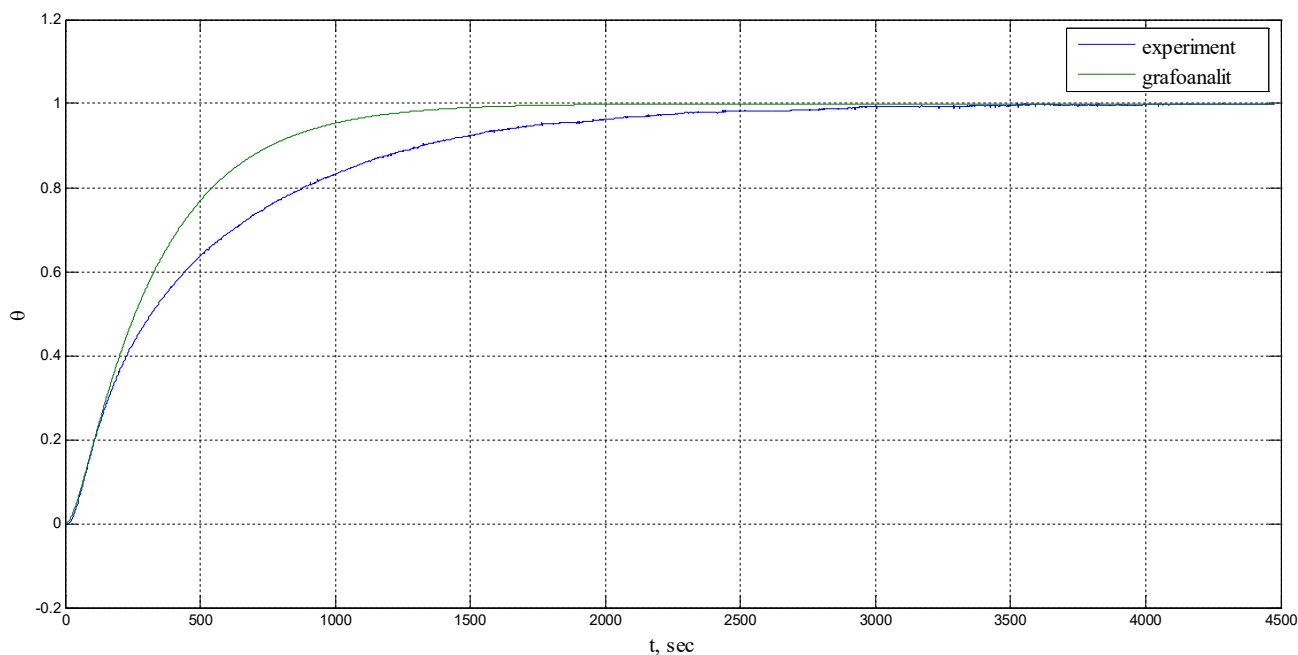


Рис.3.9. Експериментальна та теоретична криві розгону (графоаналіт. спосіб наближ.).

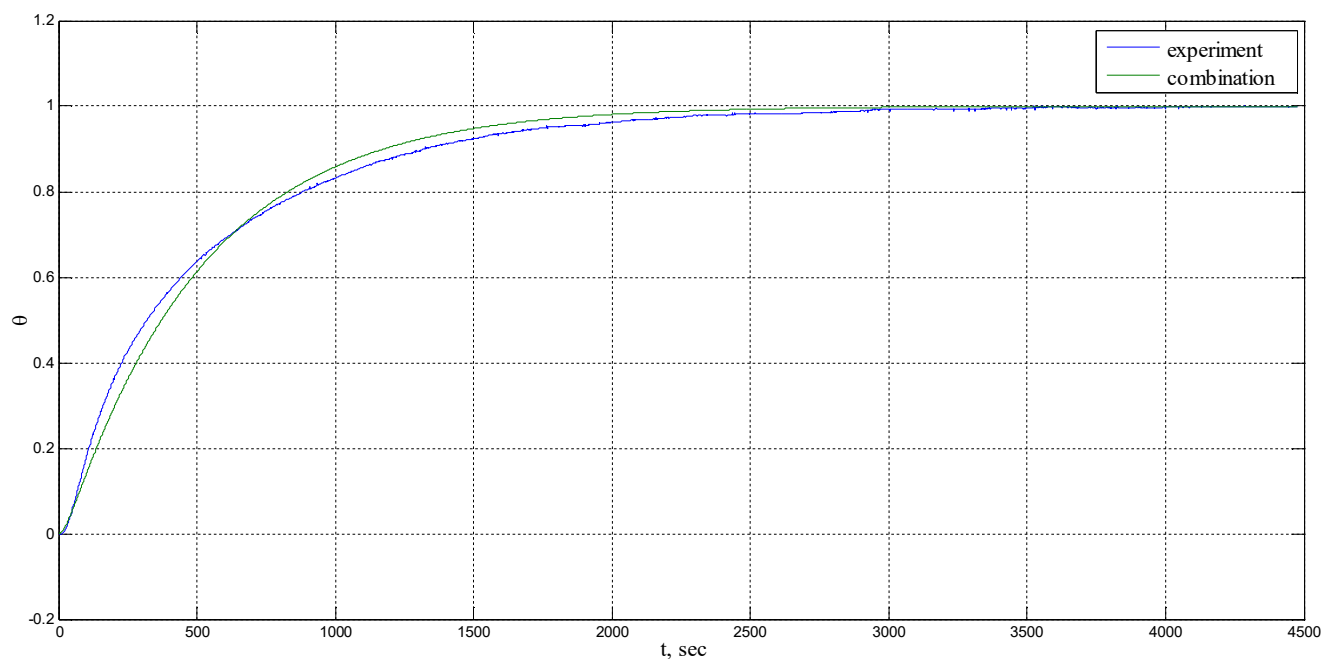


Рис.3.10. Експериментальна та теоретична криві розгону (комбінований спосіб наближ.).

Результати визначення сталих часу різними способами та розрахунку максимальної зведеної похибки для кожного способу, представлені у табл.3.5.

Таблиця 3.5

Результати визначення сталих часу функції передачі ОР каналом регулювання

Спосіб визначення	T_{1x} , с	T_{2x} , с	δ_{\max} , %
Чисельний	524,770	$3,2 \cdot 10^{-5}$	5
Графоаналітичний	352,827	112,238	14
Комбінований	524,77	112,238	7

Із результатів, представлених у табл.3.5, видно, що чисельний спосіб забезпечує найменшу похибку наближення, вона становить 5 %, але у цьому способі стала часу T_{2x} є близькою до нуля. Тобто чисельний спосіб наближає двоємнісний об'єкт ланкою першого порядку і це не відповідає фізичній суті об'єкта, для якого здійснюється побудова математичної моделі. Тому чисельний спосіб не забезпечить адекватного опису досліджуваного теплового 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 і на теоретичній кривій. Проте похибка цього способу є досить велика і становить 14 %.

Тому було запропоновано комбінований спосіб. Суть його полягає в тому, що стала часу T_{1x} береться з чисельного способу, а T_{2x} – з графоаналітичного. Таким чином отримано значення сталих часу моделі двоємнісного об'єкта із задовільною похибкою, яка становить 7 %.

Функція передачі аперіодичної ланки другого порядку може бути представлена у вигляді добутку двох аперіодичних ланок першого порядку:

$$W_{OP}^x(p) = \frac{k_x}{(a_x p + 1)} \cdot \frac{1}{(b_x p + 1)}. \quad (3.4)$$

У рівнянні (3.4) сталі часу для комбінованого способу дорівнюють: $a_x=499,55$ с; $b_x=25,22$ с. Значення коефіцієнта передачі, на основі рівняння статичної характеристики, становить $k_x=0,5446$ °C/%.

Динамічна модель об'єкта для каналу збурення

Для побудови динамічної моделі об'єкта регулювання каналом збурення було прийнято за основу дві експериментальні криві розгону – нагріву та охолодження (крива 4 та крива 5 на рис.3.4). Збурення було нанесено зміною витрати повітря, яке проходить через піч, шляхом зміни положення заслінки на виході вентилятора. Заслінку було призакрыто на 50 % і температура почала зростати. Після приходу до рівноважного стану заслінку було знову відкрито до 100 % і температура почала спадати. Нормовані криві нагріву та охолодження представленні на рис.3.11.

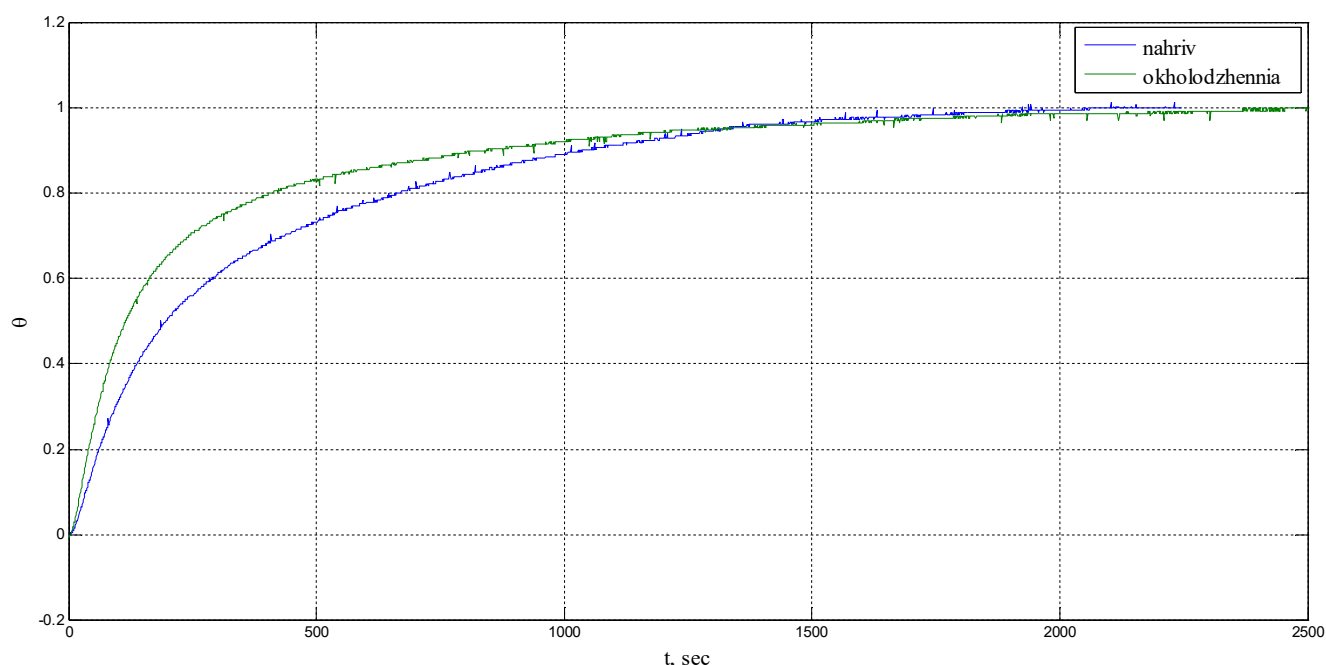


Рис.3.11. Нормовані експериментальні криві розгону для каналу збурення.

З графіка на рис.3.11 видно, що динаміка при нагріві та при охолодженні є різною. Для побудови математичної моделі об'єкта регулювання каналом збурення було обрано також функцію передачі у вигляді ланки другого порядку:

$$W_{OP}^z(p) = \frac{k_z}{T_{2z}^2 p^2 + T_{1z} p + 1}, \quad (3.5)$$

де k_z – коефіцієнт передачі об'єкта каналом збурення; T_{1z} , T_{2z} – сталі часу об'єкта каналом збурення.

Усереднену криву нагріву та охолодження було наближено теоретичною трьома способами, як це було описано вище для каналу регулювання. Результати визначення сталих часу T_{1z} і T_{2z} різними способами наведені у табл.3.6.

Таблиця 3.6

Результати визначення сталих часу функції передачі ОР каналом збурення

Спосіб визначення	T_{1z} , с	T_{2z} , с	δ_{\max} , %
Чисельний	300,85	$1,0 \cdot 10^{-5}$	11
Графоаналітичний	172,56	43,986	18
Комбінований	300,85	43,986	12

Із результатів, представлених у табл.3.6, видно, що жоден зі способів не забезпечив задовільної точності. Похибки становлять 11, 18, 12 %. Це досить великі значення похибки, тому було вирішено змінити структуру моделі та виконати розрахунок її параметрів, за допомогою двох кроків.

На першому кроці функцію передачі аперіодичної ланки другого порядку було виражено у вигляді добутку двох аперіодичних ланок першого порядку і в модель введено коректуючу ланку у вигляді реальної диференціюючої ланки з запізненням:

$$W_{OP}^z(p) = \frac{k_z}{(a_z p + 1)} \cdot \frac{1}{(b_z p + 1)} - \frac{k_k p}{(a_k p + 1)} \cdot \frac{e^{-\tau \cdot p}}{(b_k p + 1)}, \quad (3.6)$$

де a_z, b_z – сталі часу об'єкта каналом збурення; k_k – коефіцієнт передачі коректуючої ланки; a_k, b_k – сталі часу коректуючої ланки; τ – час запізнення коректуючої ланки.

Такий вигляд коректуючої ланки отримано наступним чином (див. рис.3.12): синя крива – це експериментальна крива розгону (крива охолодження), зелена – теоретична крива, отримана графоаналітичним способом наближення (зменшене у функції передачі (3.6)). У результаті віднімання синьої кривої від зеленої отримано червону криву. Червона крива була наближена бірюзовою

кривою, що описується реальною диференціюючою ланкою зі запізненням (коректуюча ланка, від'ємник у функції передачі (3.6)). Віднявши бірюзову криву від зеленої отримано фіолетову криву, яка є результуючою кривою, що описується функцією передачі (3.6).

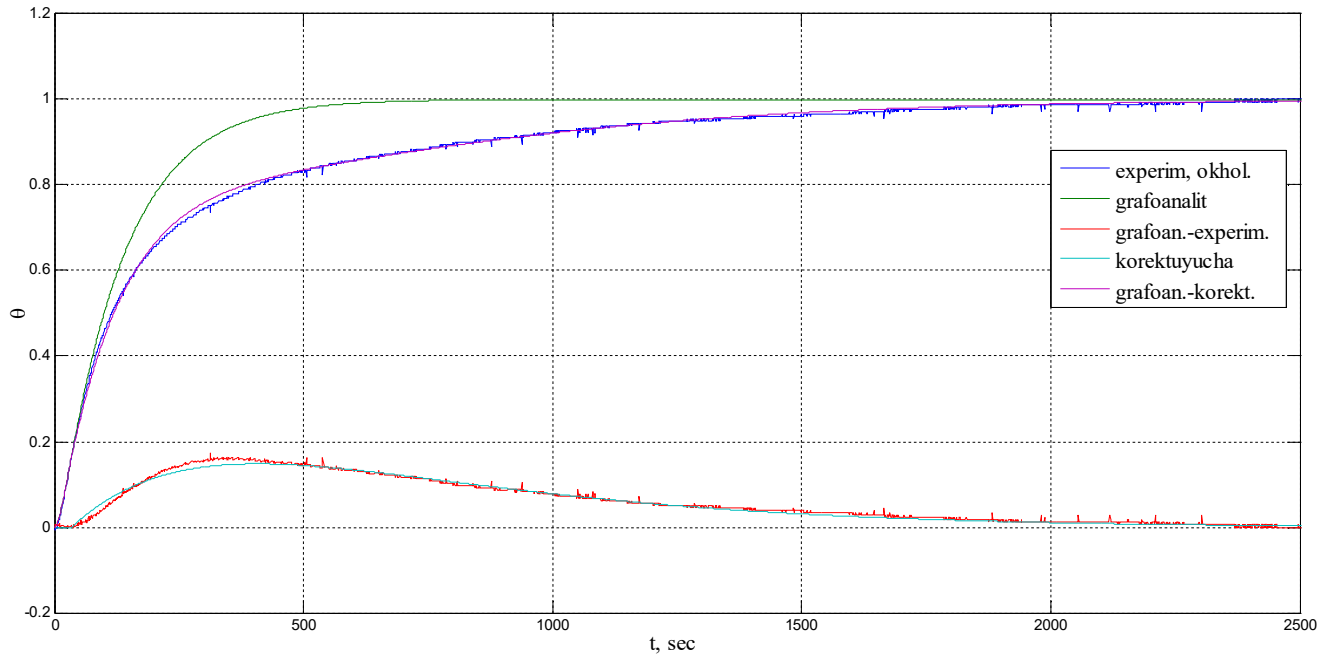


Рис.3.12. Усереднена експериментальна та теоретичні криві розгону.

На другому кроці перший множник зменшеного отриманої функції передачі було замінено нелінійним диференціальним рівнянням, яке забезпечує різну динаміку ОР при нагріві та при охолодженні:

$$\frac{k_z}{(a_z p + 1)} \quad \Longrightarrow \quad a_z \cdot \frac{dy_{np1}}{dt} + (y_{np1})^n = c \cdot k_z \cdot z, \quad (3.7)$$

де y_{np1} – проміжний сигнал між аперіодичними ланками першого порядку моделі каналу збурення; c – коректуючий множник коефіцієнта передачі каналом збурення; n – степінь другого доданка лівої частини, що забезпечує нелінійність диференціального рівняння.

У результаті отримано динамічну модель об'єкта регулювання каналом збурення у вигляді такої системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} a_z \cdot \frac{dy_{np1}}{dt} + (y_{np1})^n = c \cdot k_z \cdot z; \\ b_z \cdot \frac{dy_z}{dt} + y_z = y_{np1}; \\ a_k \cdot \frac{dy_{np2}}{dt} + y_{np2} = k_k \cdot \frac{dz}{dt}; \\ b_k \cdot \frac{dy_k}{dt} + y_k = y_{np2}; \\ y(t) = y_z(t) - y_k(t - \tau), \end{cases} \quad (3.8)$$

де y_{np2} – проміжний сигнал між реальною диференціюючою ланкою та аперіодичною ланкою першого порядку коректуючої ланки каналу збурення; y_k – вихідний сигнал коректуючої ланки; y_z – вихідний сигнал основної ланки; y – вихідний сигнал моделі ОР каналом збурення.

Перших два рівняння системи (3.8) описують добуток двох функцій передачі зменшеного функції передачі (3.6) із введеною нелінійністю. Других два рівняння системи (3.8) описують добуток двох функцій передачі коректуючої ланки (від'ємник функції передачі (3.6)) без врахування запізнення. Запізнення описується останнім рівнянням системи (3.8). Числові значення коефіцієнтів та сталих часу отриманої моделі:

$$\begin{aligned} a_z &= 90,46 \text{ с}; & \tau &= 35 \text{ с}; \\ b_z &= 10,91 \text{ с}; & a_k &= b_k = 282,66 \text{ с}; \\ k_z &= -0,2320 \text{ }^\circ\text{C}/\%; & n &= 0,8494; \\ k_k &= -37,8464 \text{ }^\circ\text{C}/\%; & c &= 0,6913. \end{aligned}$$

У тому випадку, коли n та c у першому рівнянні системи (1.8) дорівнювали б “одиниці”, то ця система диференціальних рівнянь повністю відповідала б наведеній вище функції передачі (3.6). Шляхом введення n та c забезпечується різна динаміка ОР при нагріві та при охолодженні.

Далі було виконано порівняння кривих розгону, отриманих за допомогою виведеної моделі, з експериментальними кривими розгону (рис.3.13). Максимальна похибка моделі для кривої нагріву становить 9 %, а для кривої охолодження – 6 %. Також було побудовано нормовані теоретичні криві розгону (нагрів та охолодження), що дає отримана динамічна модель об'єкта регулювання каналом збурення (див. рис.3.14). З графіка на рис.3.14 видно, що модель забезпечує різну динаміку при нагріві та при охолодженні.

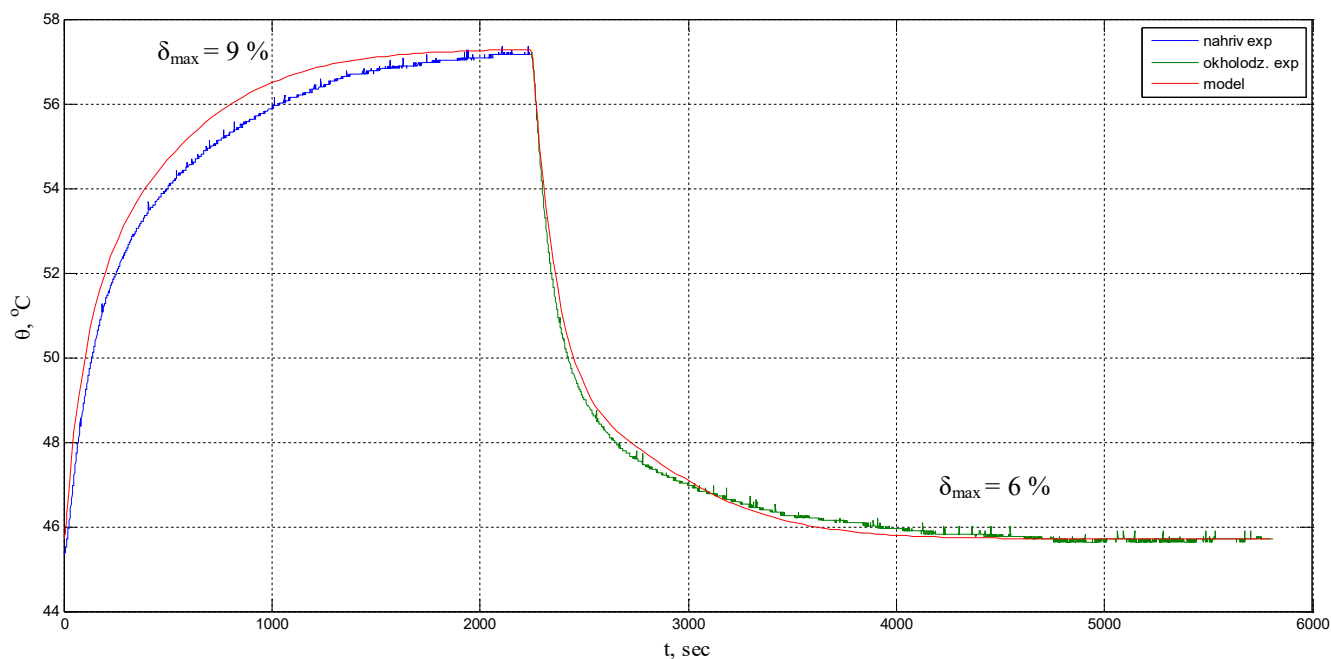


Рис.3.13. Експериментальні та теоретичні криві розгону каналом збурення.

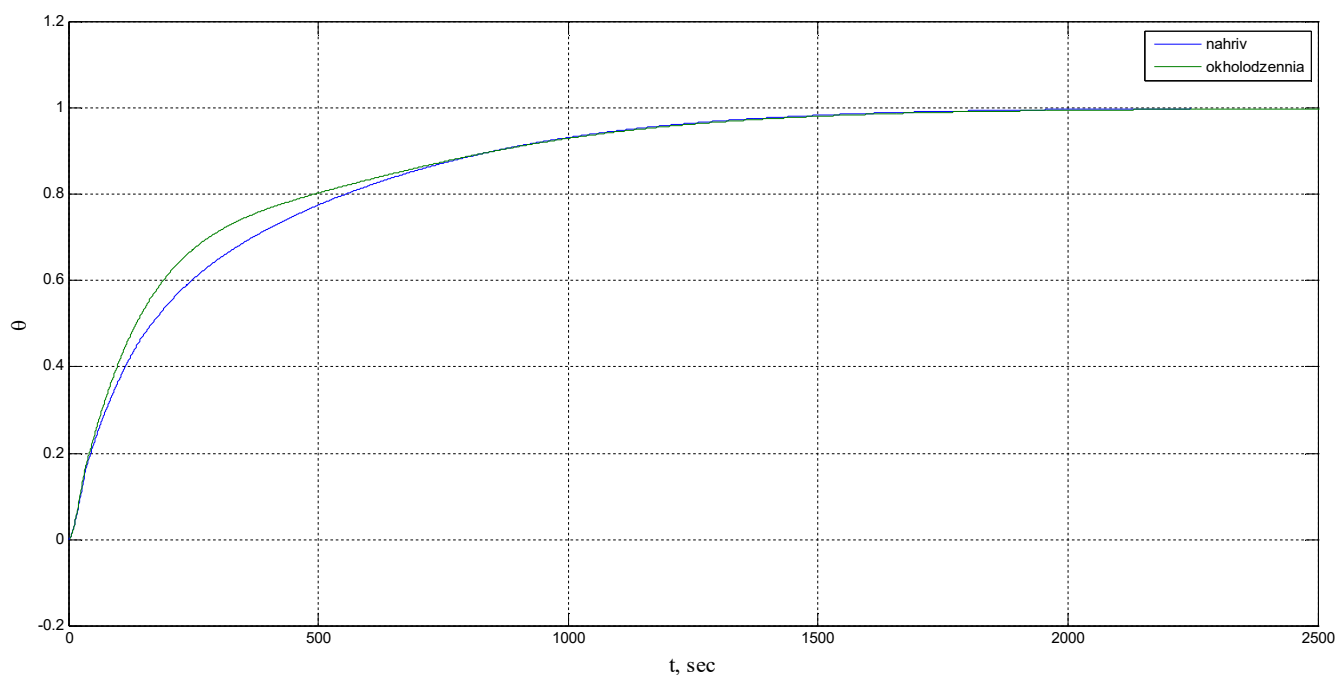


Рис.3.14. Нормовані теоретичні криві розгону (нагрів та охолодж.) для каналу збурення.

3.1.3. Реалізація та дослідження моделі теплового об'єкта за допомогою програмованого логічного контролера

Отримана модель об'єкта регулювання була реалізована (запрограмована) у ПЛК МІК-51Н фірми МІКРОЛІ [132] із застосуванням програмного середовища Alfa 2.0 [133]. Для реєстрації трендів перехідних процесів було застосовано програмний пакет МІК-реєстратор 1.1.14 [135]. Структурна схема моделі зображена на рис.3.15 і вона складається з двох частин: нижня частина – це модель об'єкта для каналу регулювання; верхня частина – модель для каналу збурення.

Нижня частина схеми реалізує функцію передачі (3.4), а верхня – систему диференціальних рівнянь (3.8).

На структурній схемі моделі об'єкта регулювання аперіодичні ланки першого порядку представлені у вигляді інтеграторів, охоплених від'ємним зворотним зв'язком. Таке схемне рішення було застосовано для швидкого переведення моделі у початковий стан шляхом обнулення інтеграторів, що забезпечує суттєву економію часу під час експериментального дослідження моделі об'єкта регулювання на ПЛК МІК-51Н.

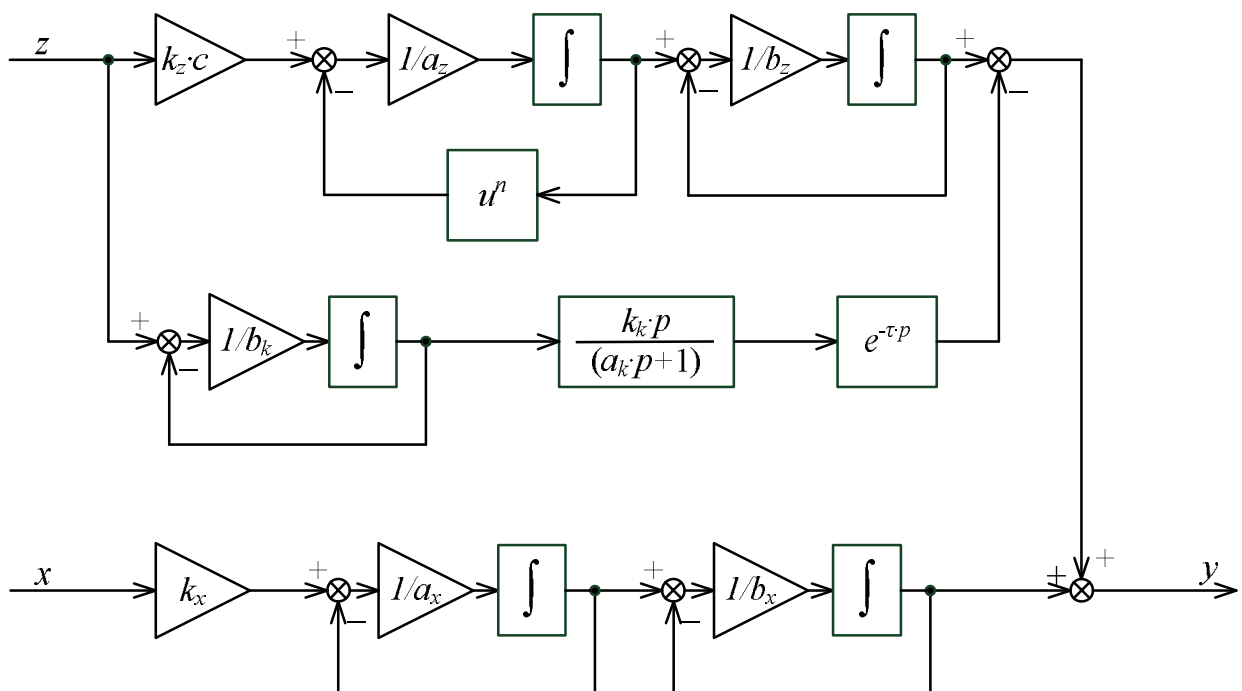


Рис.3.15. Структурна схема моделі об'єкта регулювання для її реалізації у ПЛК.

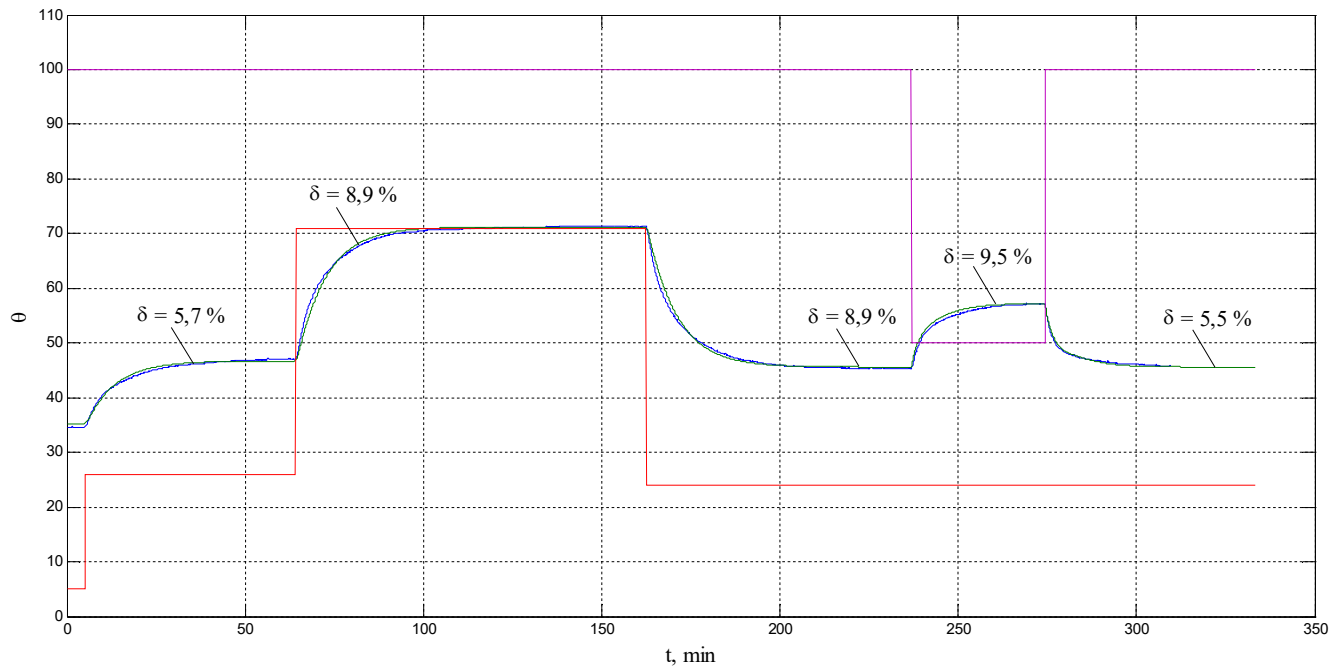


Рис.3.16. Порівняння змодельованих та експериментальних кривих розгону:
синя – експериментальна крива, θ (піч); зелена – змодельована крива θ (ПЛК);
червона – регулююча дія, μ_W ; фіолетова – збурення, μ_Z .

Виконано порівняння експериментальних кривих розгону, отриманих на реальному об'єкті (електрична піч), з експериментальними кривими розгону, отриманими за допомогою реалізованої моделі в контролері МІК-51Н. Графіки порівняння кривих розгону представлені на рис.3.16.

З рис.3.16 видно, що перехідні процеси, отримані за допомогою моделі, реалізованої у ПЛК (зелена крива), практично співпадають з перехідними процесами, отриманими на реальному об'єкті (синя крива). Для кожної кривої представлено максимальну відносну похибку між змодельованим на ПЛК сигналом та експериментальною кривою. Значення цих похибок відповідають сумарним похибкам, які дає динамічна модель об'єкта регулювання разом з його статичною моделлю (рівняннями статичної характеристики).

Модель об'єкта регулювання, реалізована у ПЛК МІК-51Н, була також застосована для імітації об'єкта регулювання у складі системи автоматичного регулювання. Автоматичні регулятори були запрограмовані на інших ПЛК із застосуванням відповідних програмних пакетів, а саме Simatic S7-300 (Step 7 [166]) та Modicon M340 (UnityProXL [167]). Реєстрація трендів перехідних процесів здійснювалася із застосуванням програмного пакету InTouch Wonderware [168].

3.2. Дослідження кульового барабанного млина як об'єкта регулювання

Технологічні процеси подрібнення твердих матеріалів за допомогою кульових барабанних млинів (КБМ) є важливими для багатьох галузей промисловості. Особливе значення вони мають для теплових електричних станцій (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 на ТЕС, 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 [169]-[173]. 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. Це вимагає з одного боку достовірної інформації щодо основних технологічних параметрів процесу розмелювання, зокрема ступеня завантаження млина матеріалом, який розмелюється, а з іншого боку – застосування досконалих алгоритмів управління, за допомогою яких можна було б забезпечити максимальну можливу продуктивність млина.

Ще одним важливим завданням при керуванні роботою КБМ є забезпечення надійності його роботи для уникнення таких аварійних ситуацій, як завал млина, вибух аеросуміші чи блокування пилепроводів. Для вирішення цього завдання у системі керування роботою КБМ повинні бути передбачені захисти за основними технологічними параметрами (вібрація опори переднього підшипника млина, температура аеросуміші на виході млина та перепад тисків на барабані млина).

КБМ є нелінійним об'єктом, що зумовлене особливостями тепло-масо-обмінних та газодинамічних процесів, які відбуваються у ньому. Побудова моделі КБМ дозволить виконувати дослідження перехідних процесів для різних технологічних режимів роботи, дасть можливість визначити структуру та

параметри системи автоматичного керування цим складним об'єктом, а також забезпечить підвищення ефективності, продуктивності та надійності роботи КБМ.

3.2.1. Аналіз параметрів вібрації млина, які визначають характеристики процесу розмелювання

Проведений аналіз енергетичних потоків в КБМ на основі [174]-[177] показав, що існує чітка залежність між енергією, яку витрачають кулі у млині на збудження вібрації корпусу КБМ, і кількістю матеріалу, що знаходиться в його барабані. Звідси випливає, що за енергією вібрації корпусу млина чи його підшипників можна робити висновки про кількість матеріалу в його барабані.

Взаємодія куль з барабаном КБМ здійснюється у вигляді ударів та має імпульсний характер. Тому після кожного співударяння куль безпосередньо з бронею барабану млина в матеріал броні передається частина енергії у вигляді пружних хвиль. При цьому, чим менша тривалість удару, тим більша частина енергії співударяння переходить у хвильовий процес. Ці хвилі, поширюючись по корпусу млина, несуть інформацію про характер взаємодії куль з барабаном млина.

Акустичний канал поширення вібрації від взаємодії кульового заряду і броні млина при його роботі до первинного перетворювача вібрації включає в себе досить складну динамічну систему. Первинний перетворювач вібрації найбільш доцільно встановлювати на опорі підшипника барабана КБМ, оскільки всі інші частини млина постійно обертаються і зняття з них сигналу віброперетворювача є складним завданням.

Результати дослідження спектральних характеристик віброшвидкості і віброприскорення переднього та заднього підшипників млина типу ШБМ-50 представлено у [178]. Ці характеристики мають яскраво виражений максимум в діапазоні частот від 2 до 6 кГц. Величина цього максимуму змінюється від завантаженості млина, причому при збільшенні завантаженості млина величина максимуму зменшується.

Середньоквадратичний рівень віброприскорення для переднього підшипника змінюється значно більше, ніж для заднього підшипника при зміні продуктивності млина на задану величину. Це можна пояснити тим, що концентрація розмелюваного матеріалу на вході в барабан млина (біля переднього підшипника) змінюється більш інтенсивно, ніж на виході (біля заднього підшипника) при зміні продуктивності КБМ.

Залежність середньоквадратичного рівня віброприскорення переднього підшипника від відносної завантаженості млина має обернено-пропорційний характер. Значення віброприскорення змінюється в діапазоні від 56 до $0,5 \text{ м/с}^2$ для млина типу ШБМ-50.

3.2.2. Експериментальне дослідження перехідних процесів у млині

Експериментальні дослідження перехідних процесів було виконано на тепловій електростанції для діючого КБМ (табл.3.7). Сигнали температури аеросуміші на виході млина, вібрації опори переднього підшипника та перепаду тиску на млині було отримано у безрозмірній формі (вихідні сигнали АЦП) і вони знаходилися в межах від 0 до 255. Давач температури був проградуєований в межах $0-100 \text{ }^\circ\text{C}$, давач перепаду тисків – в межах $0-5000 \text{ Па}$, а давач вібрації – в межах $0-100\%$.

Після масштабування експериментальних сигналів температури аеросуміші на виході млина, вібрації опори переднього підшипника та перепаду тиску на млині згідно відповідних діапазонів вимірювання отримано графіки експериментальних даних у більш зручній формі (рис.3.17).

При подачі вугілля у млин вібрація опори переднього підшипника та температура аеросуміші на виході млина зменшується (рис.3.17). Зменшення вібрації показує, що кількість вугілля в млині збільшується, оскільки взаємозв'язок між цими параметрами – обернений. Зміна кількості матеріалу в млині на основі експериментальних даних і з врахуванням обернено-пропорційного зв'язку між сигналом вібрації та завантаженістю млина (кількістю вугілля в млині) представлена на рис.3.18.

Таблиця 3.7

Характеристики досліджуваного кульового барабанного млина

Назва параметра	Значення
Внутрішній діаметр барабана (без футеровки), мм	2400
Внутрішня довжина барабана (без футеровки), мм	4000
Номінальна частота обертання барабана, об/хв	21,9
Маса куль, т	50
Встановлена потужність електродвигуна, кВт	1600
Частота обертання ротора електродвигуна, об/хв	100
Напруга живлення електродвигуна, В	6000
Маса млина без електричного обладнання, фундаментної арматури, пристроїв механізації та боротьби з шумом куль, т, не більше	95
Номінальна продуктивність, т/год	25

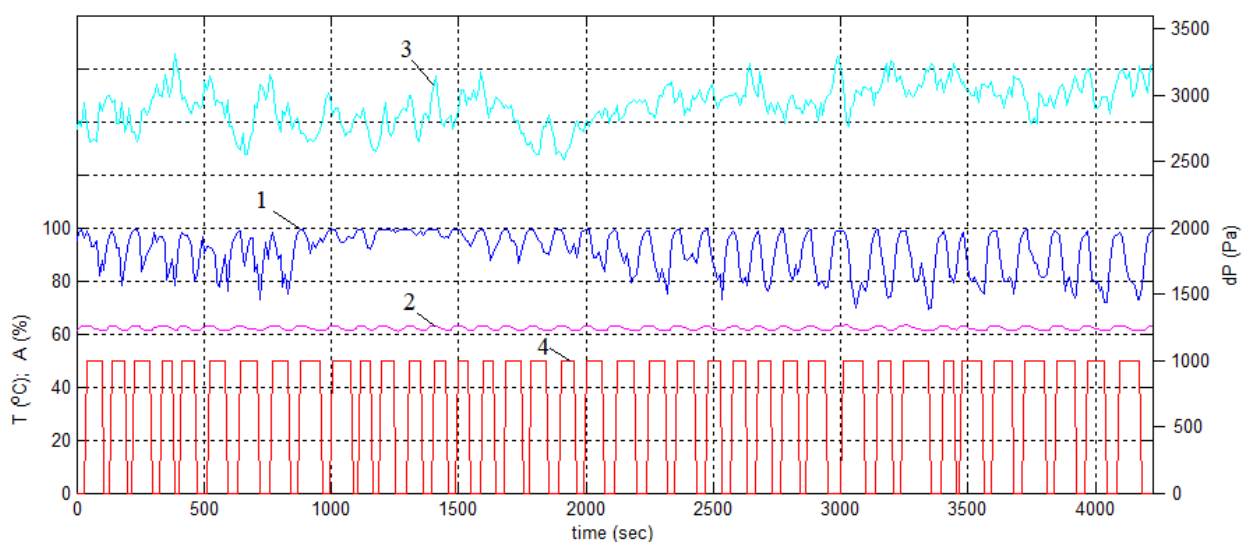


Рис. 3.17. Експериментальні дані зміни основних технологічних параметрів згідно діапазонів вимірювання під час роботи КБМ: 1 – сигнал вібродавача на вхідному підшипнику (%); 2 – температура аеросуміші на виході млина (°C); 3 – перепад тиску на барабані млина (Па); 4 – подача вугілля у млин

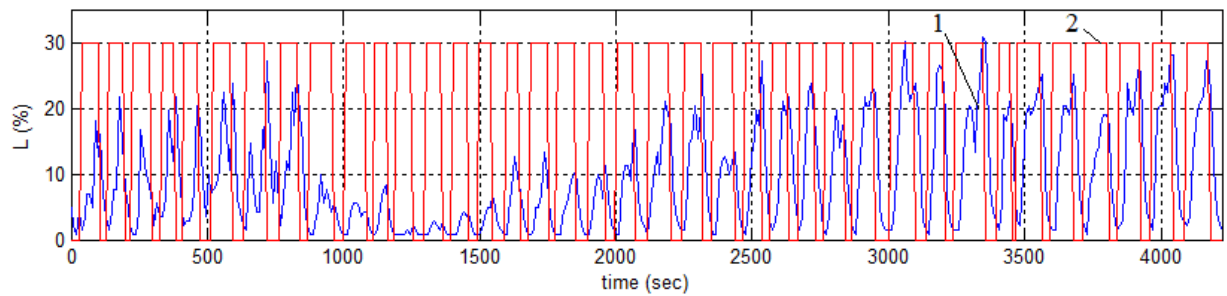


Рис.3.18. Експериментальні дані зміни завантаженості млина (1)
та подачі вугілля у млин (2)

Отримані експериментальні дані застосовано для побудови математичної моделі КБМ та перевірки її адекватності.

3.2.3. Розробка математичної моделі кульового барабанного млина

Математичне моделювання процесів розмелювання вугілля у КБМ досліджувалося у роботах [179]-[191], де наведено опис таких моделей, як дифузійна, комірчаста, модель ідеального витіснення, ідеального перемішування та ін. Вказані моделі є теоретичними і розроблені без врахування результатів експериментального дослідження. Крім цього, деякі моделі стосуються окремих елементів КБМ, а не усього млина як єдиної системи.

Для розробки математичної моделі КБМ застосовано спрощену структурну схему взаємозв'язку між параметрами (рис.3.19). На практиці подача вугілля у млин здійснюється на основі виміряного значення температури аеросуміші на виході. Всі інші виміряні сигнали діють як обмеження для захисту млина. Математична модель КБМ повинна пов'язувати температуру аеросуміші на виході млина (T_a), завантаженість млина (L) та перепад тиску на млині (ΔP) з наступними параметрами:

- 1) температура сушильного агента на вході (збурення, $T_{c,a}$);
- 2) витрата сушильного агента на вході (збурення, $F_{c,a}$);
- 3) витрата вугілля на вході (вхідна величина (регулююча дія), F_B);
- 4) вологість вугілля (збурення, W_B).

Для побудови математичної моделі кульового барабанного млина застосована схема, що представлена на рис.3.20.

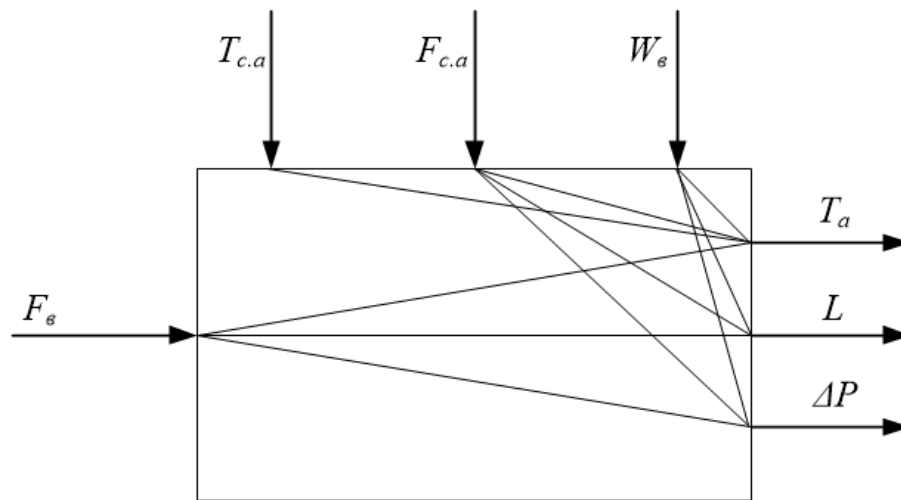


Рис.3.19. Спрощена структурна схема взаємозв'язку між технологічними параметрами КБМ

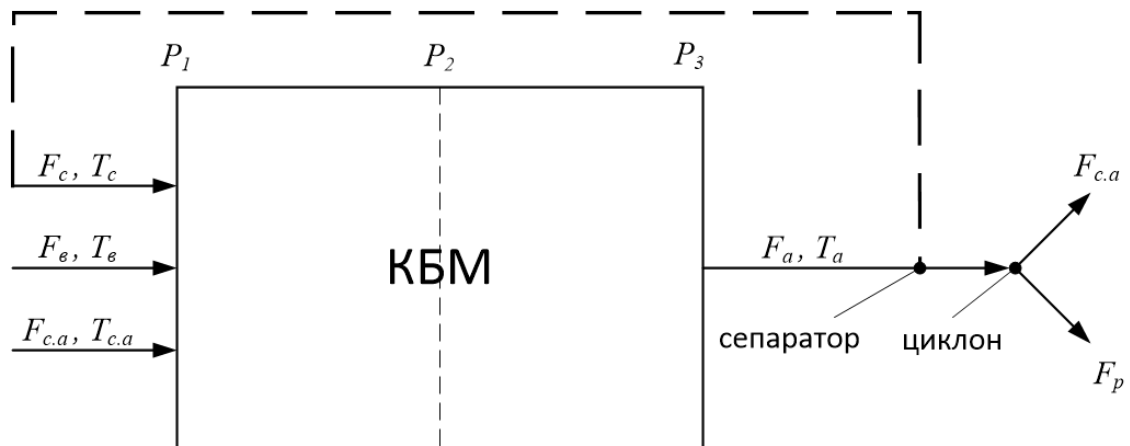


Рис.3.20. Схема КБМ для виведення його математичної моделі

Зміна маси матеріалу в млині з часом описується законом збереження маси:

$$\frac{dm_M}{dt} = F_{c.a} \cdot \rho_{c.a} + F_B^m + F_C^m - F_a \cdot \rho_a, \quad (3.9)$$

де m_M – маса повітряно-вугільної суміші у КБМ, кг; $F_{c.a}$ – витрата сушильного агента, що подається на вхід КБМ, $\text{м}^3/\text{с}$; $\rho_{c.a}$ – густина сушильного агента (суміш

димових газів з повітрям), кг/м^3 ; F_B^m – витрата сирого вугілля, що поступає в КБМ, кг/с ; F_C^m – витрата вугілля, що повертається у КБМ із сепаратора, кг/с ; F_a – витрата аеросуміші, що виходить із КБМ, $\text{м}^3/\text{с}$; ρ_a – густина аеросуміші (суміш вугільного пилу зі сушильним агентом), кг/м^3 .

Символ m у верхньому індексі витрат сирого вугілля (F_B^m) та повернення з сепаратора (F_C^m) вказує на те, що у рівнянні (3.9) ці витрати виражені у масових одиницях (кг/с), тоді як витрати сушильного агента ($F_{c.a}$) і аеросуміші (F_a) – в об'ємних одиницях ($\text{м}^3/\text{с}$).

Маса повітряно-вугільної суміші у КБМ:

$$m_m = V_m \cdot \rho_m, \quad (3.10)$$

де V_m – об'єм повітряно-вугільної суміші у КБМ, м^3 ; ρ_m – густина повітряно-вугільної суміші у КБМ, кг/м^3 .

Рівняння зміни об'ємної витрати сушильного агента буде мати вигляд:

$$A \cdot \frac{dF_{c.a}}{dt} + F_{c.a}^2 = k^2 \cdot \frac{P_1 - P_2}{\rho_{c.a}}, \quad (3.11)$$

де A , k – коефіцієнти, що враховують конструктивні розміри КБМ; P_1 – тиск на вході КБМ, Па; P_2 – тиск всередині КБМ, Па.

Коефіцієнти A та k розраховуються за формулами:

$$A = \frac{4\pi r^3}{\xi}; \quad (3.12)$$

$$k = \sqrt{\frac{8\pi^2 r^5}{l\xi}}, \quad (3.13)$$

де r – радіус барабана КБМ, м; ξ – коефіцієнт опору рухові аеросуміші в КБМ; l – довжина барабана КБМ, м.

Рівняння зміни об'ємної витрати аеросуміші буде мати вигляд:

$$A \cdot \frac{dF_a}{dt} + F_a^2 = k^2 \cdot \frac{P_2 - P_3}{\rho_a}. \quad (3.14)$$

Сире вугілля подається у млин за допомогою стрічкового конвеєра, тому при моделюванні будемо вважати, що масова витрата сирого вугілля є постійною ($F_B^m = const$). Масова витрата вугілля, що повертається у КБМ із сепаратора (F_C^m), становить близько 40% від розмелювальної продуктивності млина (F_p^m) і визначається за рівнянням:

$$F_C^m = 0,4 \cdot F_p^m . \quad (3.15)$$

Розмелювальна продуктивність млина буде визначатись за формулою:

$$F_p^m = F_a(t - \tau_M) \cdot \rho_a(t - \tau_M) - F_C^m - F_{a.0} \cdot \rho_{a.0} , \quad (3.16)$$

де $F_{a.0}$ – об’ємна витрата аеросуміші у початкових умовах (рівна $F_{c.a.}$); $\rho_{a.0}$ – густина аеросуміші у початкових умовах (рівна $\rho_{c.a.}$); τ_M – транспортне запізнення руху вугілля вздовж млина.

Підставивши (3.15) у (3.16) після перестановок отримаємо:

$$F_p^m = (F_a(t - \tau_M) \cdot \rho_a(t - \tau_M) - F_{a.0} \cdot \rho_{a.0}) / 1,4 . \quad (3.17)$$

Транспортне запізнення руху вугілля вздовж млина розраховується за формулою:

$$\tau_M = \frac{V_M}{F_{c.a}} . \quad (3.18)$$

Перепад тиску на КБМ визначається за рівнянням:

$$\Delta P = P_1 - P_3 = P_1 - P_2 + P_2 - P_3 . \quad (3.19)$$

Різницю тисків $P_2 - P_3$ можна визначити за рівнянням:

$$P_2 - P_3 = \frac{(F_a^m)^2}{k^2 \cdot \rho_a} . \quad (3.20)$$

Для можливості моделювання зміни перепаду тиску на КБМ приймемо, що ΔP змінюється за рахунок зміни витрати аеросуміші (F_a^m), а густина аеросуміші ρ_a

залишається незмінною і дорівнює густині сушильного агента $\rho_{c.a}$. При моделюванні зміни перепаду тиску на барабані млина приймемо, що ΔP змінюється із транспортним запізненням (τ_m). Із врахуванням прийнятих припущень ΔP може бути розраховане так:

$$\Delta P = P_1 - P_2 + \frac{(F_a^m(t - \tau_m))^2}{k^2 \cdot \rho_{c.a}}. \quad (3.21)$$

Масову витрату в рівнянні (3.21) будемо розраховувати за формулою $F_a^m = F_a \cdot \rho_a$. Зміна теплоти у млині з часом описується законом збереження тепла:

$$\frac{dq_m}{dt} = Q_{вх} - Q_{вих}, \quad (3.22)$$

де q_m – кількість тепла всередині КБМ, Дж; $Q_{вх}$ – кількість тепла, яка поступає у КБМ, Дж/с; $Q_{вих}$ – кількість тепла, що виходить з КБМ, Дж/с.

Кількість тепла всередині КБМ:

$$q_m = T_m \cdot m_m \cdot c_{p_m}, \quad (3.23)$$

де T_m – температура повітряно-вугільної суміші в КБМ, К; c_{p_m} – питома теплоємність повітряно-вугільної суміші в КБМ, Дж/(кг·К).

Кількість тепла, яка поступає у КБМ складається з таких компонентів:

$$Q_{вх} = Q_{вх.c.a} + Q_{вх.в} + Q_{вх.c}, \quad (3.24)$$

де $Q_{вх.c.a}$ – кількість тепла, що поступає зі сушильним агентом у КБМ, Дж/с; $Q_{вх.в}$ – кількість тепла, що поступає з вугіллям у КБМ, Дж/с; $Q_{вх.c}$ – кількість тепла, що поступає з поверненням із сепаратора вугіллям у КБМ, Дж/с.

Кількість тепла, що поступає зі сушильним агентом у КБМ:

$$Q_{вх.c.a} = T_{c.a} \cdot c_{p.c.a} \cdot F_{c.a} \cdot \rho_{c.a}, \quad (3.25)$$

де $c_{p.c.a}$ – питома теплоємність сушильного агента, Дж/(кг·К).

Кількість тепла, що поступає з вугіллям у КБМ:

$$Q_{\text{вх.в}} = T_{\text{в}} \cdot c_{\text{РВ}} \cdot F_{\text{в}}^m, \quad (3.26)$$

де $c_{\text{РВ}}$ – питома теплоємність вугілля, Дж/(кг·К).

Кількість тепла, що поступає з поверненим із сепаратора вугіллям у КБМ:

$$Q_{\text{вх.с}} = 0,4 \cdot T_{\text{с}} \cdot c_{\text{РВ}} \cdot F_{\text{р}}^m. \quad (3.27)$$

Температура вугілля, що повертається в КБМ із сепаратора, розраховується за рівнянням:

$$T_{\text{с}} = \frac{T_{\text{а}} + T_{\text{в}}}{2}. \quad (3.28)$$

Кількість тепла, що виходить з КБМ:

$$Q_{\text{вих}} = Q_{\text{вих.а}} + Q_{\text{втр.м}}, \quad (3.29)$$

де $Q_{\text{вих.а}}$ – кількість тепла, що виходить з аеросумішшю з КБМ, Дж/с;
 $Q_{\text{втр.м}}$ – втрати тепла через корпус КБМ у навколишнє середовище, Дж/с.

Кількість тепла, що виходить з аеросумішшю з КБМ:

$$Q_{\text{вих.а}} = T_{\text{а}} \cdot c_{\text{Ра}} \cdot F_{\text{а}} \cdot \rho_{\text{а}}, \quad (3.30)$$

де $c_{\text{Ра}}$ – питома теплоємність аеросуміші, Дж/(кг·К).

Втрати тепла через корпус КБМ у навколишнє середовище:

$$Q_{\text{втр.м}} = K_{\text{м}} \cdot S_{\text{м}} \cdot (T_{\text{м}} - T_{\text{пов}}), \quad (3.31)$$

де $K_{\text{м}}$ – коефіцієнт теплопередачі від повітряно-вугільної суміші до навколишнього повітря через стінку барабана млина, Вт/ (м²·К); $S_{\text{м}}$ – площа зовнішньої поверхні барабана млина, м²; $T_{\text{м}}$ – температура повітряно-вугільної суміші у млині, К; $T_{\text{нов}}$ – температура навколишнього повітря, К.

Для виведення математичної моделі КБМ приймемо, що температура повітряно-вугільної суміші у млині рівна температурі аеросуміші на виході млина, тобто $T_m = T_a$, а густина повітряно-вугільної суміші у млині рівна густині аеросуміші на виході млина, тобто $\rho_m = \rho_a$.

При дослідженні перехідних процесів у КБМ будемо вважати, що завантаженість млина (кількість вугілля у млині) визначається за формулою:

$$L = (\rho_a - \rho_{a.0}) \cdot V_m. \quad (3.32)$$

Звівши рівняння (3.9)-(3.32), отримаємо математичну модель КБМ у вигляді такої системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_m \frac{d\rho_a}{dt} = F_{c.a} \cdot \rho_{c.a} + F_B^m + 0,4 \cdot F_p^m - F_a \cdot \rho_a; \\ A \cdot \frac{dF_{c.a}}{dt} + F_{c.a}^2 = k^2 \cdot \frac{P_1 - P_2}{\rho_{c.a}}; \\ A \cdot \frac{dF_a}{dt} + F_a^2 = k^2 \cdot \frac{P_2 - P_3}{\rho_a}; \\ F_p^m = (F_a(t - \tau_m) \cdot \rho_a(t - \tau_m) - F_{a.0} \cdot \rho_{a.0}) / 1,4; \\ \Delta P = P_1 - P_2 + \frac{F_a^2(t - \tau_m) \cdot \rho_a^2(t - \tau_m)}{k^2 \cdot \rho_{c.a}}; \\ L = (\rho_a - \rho_{a.0}) \cdot V_m; \\ \frac{dT_a}{dt} \cdot V_m \cdot \rho_a \cdot c_{Pa} = T_{c.a} \cdot c_{Pc.a} \cdot F_{c.a} \cdot \rho_{c.a} + T_B \cdot c_{PB} \cdot F_B^m + \\ + 0,4 \cdot \frac{T_a + T_e}{2} \cdot c_{PB} \cdot F_p^m - \\ - T_a \cdot c_{Pa} \cdot F_a \cdot \rho_a - K_m \cdot S_m \cdot (T_a - T_{нов}). \end{array} \right. \quad (3.33)$$

Для виведення математичної моделі КБМ застосовано закони збереження маси та тепла, а також рівняння теплообміну та витрати газоподібного середовища, які представлені у формулах (3.9)-(3.32), що записані на основі аналітичних залежностей, наведених у [157], [158], [224], [225].

Отримана математична модель є нелінійною і пов'язує температуру аеросуміші на виході млина (T_a), завантаженість млина (L), розмелювальну продуктивність (F_p) та перепад тисків на млині (ΔP) з такими параметрами, як

витрата і температура сушильного агента, витрата вугілля із врахуванням конструктивних розмірів млина. Система рівнянь (3.33) може бути застосована для моделювання перехідних процесів у КБМ в діапазоні відносної завантаженості від 0 до 90%, температури аеросуміші від 30 до 100 °С та перепаду тиску на млині від 1 до 5 кПа.

На основі розробленої математичної моделі виконано моделювання перехідних процесів у середовищі Simulink (Matlab) для млина із параметрами, наведеними у табл.3.7. Моделювання здійснено для режиму роботи, у якому були отримані експериментальні дані (рис.3.17, рис.3.18). Оскільки в отриманих даних містяться шуми, які вносять випадкову складову у зареєстрований перехідний процес, то експериментальні дані були усереднені для виділення корисних сигналів та усунення впливу шумів. Порівняння усереднених експериментальних значень основних технологічних параметрів (температура аеросуміші на виході млина, завантаженість та перепад тиску на млині) із результатами моделювання наведене на рис.3.21-3.23.

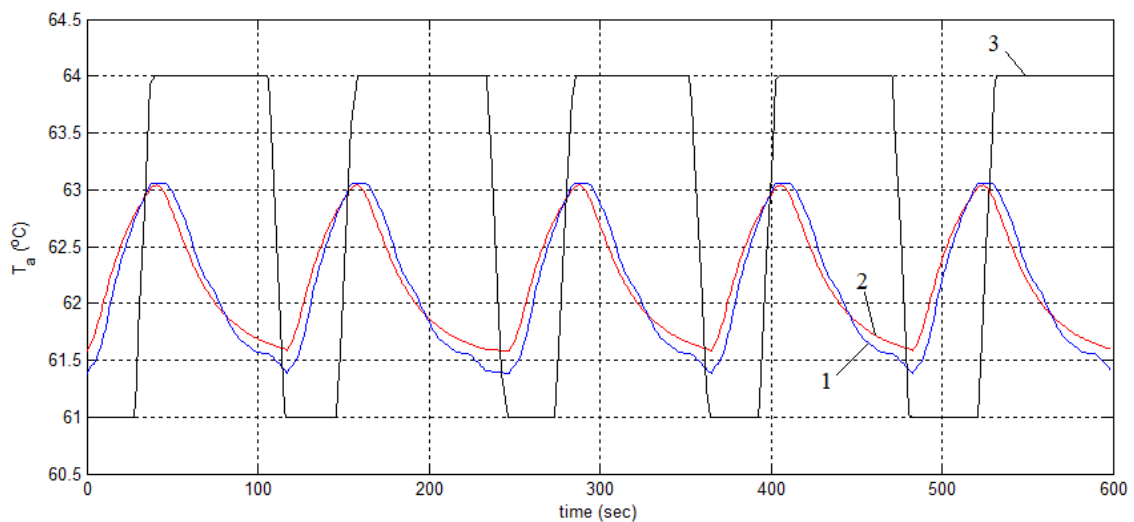


Рис.3.21. Порівняння усереднених експериментальних (1) та змодельованих (2) значень температури аеросуміші на виході млина при зміні подачі вугілля у млин (3)

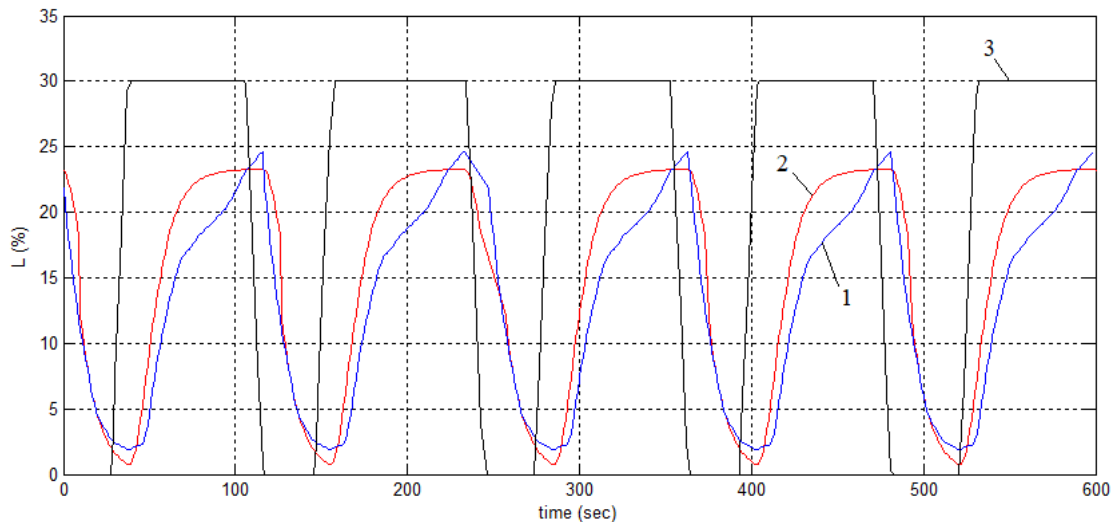


Рис.3.22. Порівняння усереднених експериментальних (1) та змодельованих (2) значень завантаженості млина при зміні подачі вугілля у млин (3)

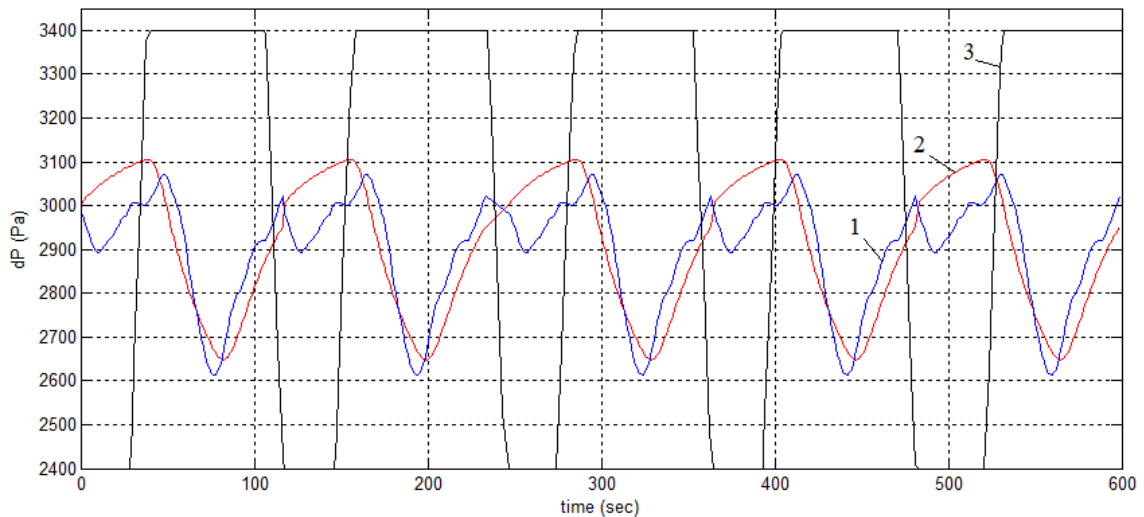


Рис.3.23. Порівняння усереднених експериментальних (1) та змодельованих (2) значень перепаду тиску на млині при зміні подачі вугілля у млин (3)

Відносна приведена похибка змодельованого сигналу температури аеросуміші на виході млина відносно усереднених експериментальних значень становить 5,0 %. Для сигналу завантаженості млина ця похибка становить 7,4 %, а для перепаду тиску на млині – 11,2 %.

На основі результатів порівняння змодельованих перехідних процесів та експериментальних даних можна зробити висновок, що розроблена модель достатньо адекватно описує перехідні процеси у КБМ і може бути застосована на практиці для дослідження цього об'єкта, а також для розроблення алгоритмів керування процесом розмелювання вугілля на ТЕС за допомогою КБМ.

3.3. Дослідження теплогенеруючих об'єктів та аналіз ефективності їх роботи

Теплогенеруючі об'єкти є стратегічно важливими елементами у всіх галузях промисловості, в комунальній сфері та побуті для забезпечення гарячого водопостачання, опалювання приміщень та подачі теплової енергії на технологічні потреби. Основне призначення таких об'єктів є виробництво теплової енергії у вигляді нагрітої води або водяної пари з відповідними параметрами. Головним елементом процесу генерування тепла є котел – водогрійний або паровий, залежно від виду вихідного теплоносія.

У склад промислового котла входять такі основні частини: паленище, екранні труби, барабан та економайзер. До допоміжного котельного устаткування відносяться тяго-дутьові і живильні пристрої, обладнання водопідготовки, системи шлако- і золоуловлювання, а також контрольно-вимірювальні прилади та засоби автоматизації [192]-[194].

Для виробництва теплової енергії у вигляді гарячої води, остання проходить такі стадії: нагрів димовими газами в зоні конвективного теплообміну та нагрів факелом в зоні радіаційного теплообміну (див.рис.3.24). У випадку виробництва теплової енергії у вигляді пари, процес перетворення є більш складним і вода проходить такі стадії: хімічна підготовка, нагрів димовими газами в економайзері, нагрів парою у верхньому барабані та перетворення на пару в екранних трубах (див.рис.3.25).

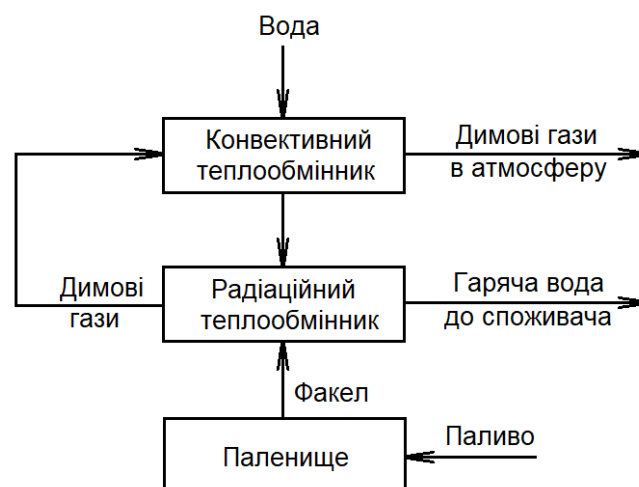


Рис.3.24. Структурна схема процесу виробництва теплової енергії на прикладі водогрійного котла.

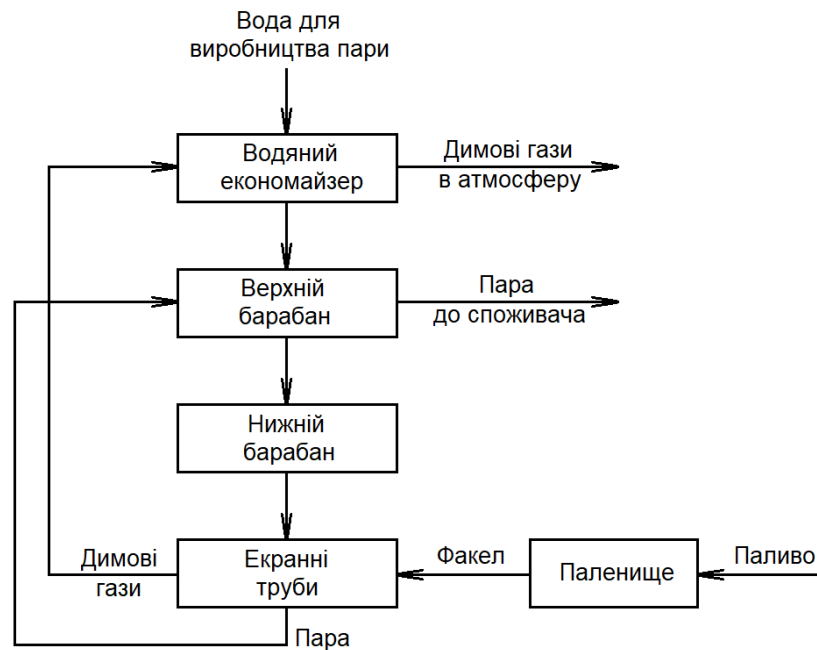


Рис.3.25. Структурна схема процесу виробництва теплової енергії на прикладі парового котла.

У якості первинного енергоносія для виробництва теплової енергії у котлах застосовують газоподібне, рідке або тверде паливо. Найбільш поширеним видом палива є природний газ, що зумовлене зручністю його постачання та транспортування, а також невеликим вмістом шкідливих речовин, які викидаються в атмосферу після його спалювання. Тому, в даному підрозділі основна увага приділена природному газу, як первинному енергоносію для виробництва тепла.

Енергоефективність теплогенеруючого об'єкта визначається кількістю енергії палива, що витрачається на виробництво одиниці теплової енергії вихідного теплоносія [195]-[197]. Для визначення енергоефективності котла складають його тепловий баланс, у якому враховують усі стадії передачі тепла та види перетворення енергії. Рівняння теплового балансу в загальному випадку має такий вигляд:

$$\frac{dQ}{dt} = \sum q_{\text{вх}} - \sum q_{\text{вих}}, \quad (3.34)$$

де dQ/dt – зміна кількості тепла в системі в часі; $\sum q_{\text{вх}}$ – сума потоків тепла на вході системи; $\sum q_{\text{вих}}$ – сума потоків тепла на виході системи.

Одним із головних параметрів для визначення енергоефективності теплогенеруючого об'єкта 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 та підвищення точності вимірювання витрати природного газу є актуальним завданням, яке потребує вирішення [198]-[204], [261].

3.3.1. Дослідження точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах

Вимірювання витрати та кількості природного газу на теплогенеруючих об'єктах може бути здійснене за допомогою різних методів. Найбільш широке застосування знайшли такі системи обліку [5], [205]-[208], [252]:

- турбінні лічильники;
- роторні лічильники;
- вихорові лічильники;
- ультразвукові лічильники;
- мембранні лічильники;
- витратоміри змінного перепаду тиску.

Оскільки газ за різних температур і тисків може займати різний об'єм, то у склад системи обліку природного газу крім лічильника входять ще вимірювальні перетворювачі температури і тиску, а також мікропроцесорний коректор, який приводить виміряне значення об'єму до стандартних умов (див.рис.3.26). Така система називається автоматизованою, оскільки отримання сигналів від вимірювальних перетворювачів, розрахунок витрати та об'єму природного газу, а також приведення об'єму газу до стандартних умов здійснюється автоматичним чином за допомогою мікроконтролера, який керує усім процесом.

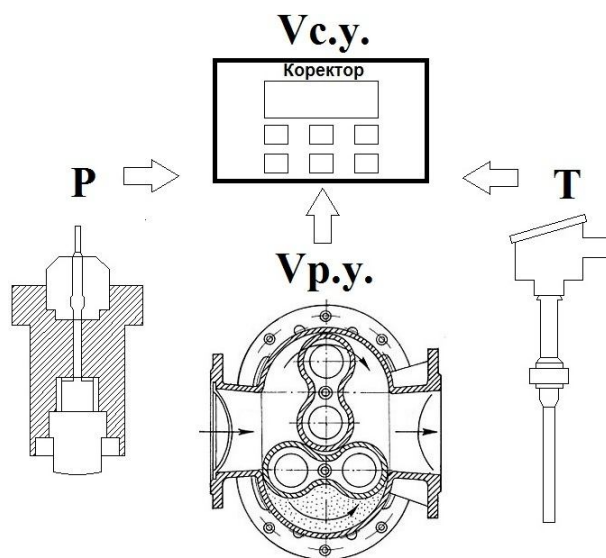


Рис.3.26. Склад автоматизованої системи обліку природного газу на базі роторного лічильника.

Точність визначення об'єму природного газу, приведенного до стандартних умов, визначається такими факторами:

- точність вимірювання об'єму газу за робочих умов;
- точність вимірювання тиску газу;
- точність вимірювання температури газу;
- точність виконання розрахунків коректором.

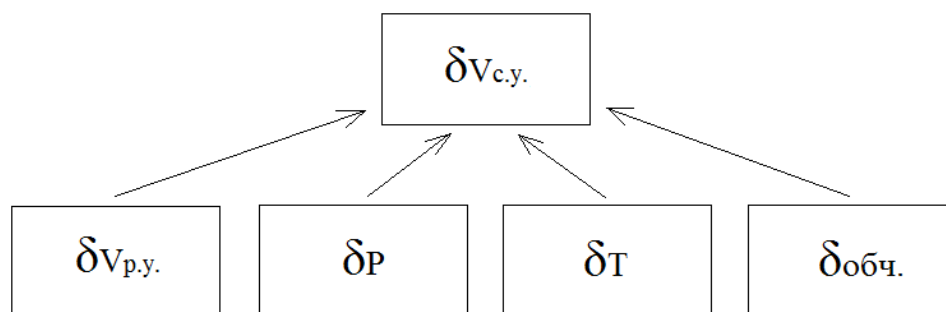


Рис.3.27. Фактори, що впливають на точність вимірювання об'єму природного газу, приведенного до стандартних умов.

На рис.3.27 зроблено такі позначення: $\delta_{v_{c.y.}}$ – похибка вимірювання об'єму природного газу, приведеного до стандартних умов; $\delta_{v_{p.y.}}$ – похибка вимірювання об'єму природного газу за робочих умов; δ_p – похибка вимірювання тиску газу; δ_T – похибка вимірювання температури газу; $\delta_{обч.}$ – похибка виконання розрахунків коректором.

Кожен із перелічених факторів безпосередньо впливає на точність визначення об'єму природного газу, приведеного до стандартних умов. Тому, під час проектування вузлів обліку важливо дотримуватись вимог чинних нормативних документів. Для витратоміра змінного перепаду тиску таким документом є стандарт ДСТУ ГОСТ 8.586.1-5 [209]-[213], розроблений на основі європейського стандарту ISO 5167.1-4 [214]-[217]. Вимоги цих стандартів є реалізовані у спеціалізованій програмі САПР «Расход-РУ» [47], [48], застосування якої суттєво спрощує процес проектування витратомірів змінного перепаду тиску. Тим не менше, наявність додаткових похибок для кожного вузла обліку потрібно аналізувати окремо.

Особливістю обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах (котельні, ТЕЦ, ТЕС) є наявність значних різниць температур потоку газу та навколишнього повітря. Така різниця температур може виникати у зимовий період, коли холодний газ знадвору поступає в тепле приміщення котельні, де встановлений вузол обліку. На теплогенеруючих об'єктах можуть також виникати коливання витрати газу, що спричинене режимами роботи газового обладнання, а саме водогрійних та парових котлів. В таких умовах похибка вимірювання температури газу може приймати особливо великі значення і вплив температурних умов роботи систем обліку на точність вимірювання витрати та кількості природного газу може бути суттєвим. Тому, врахування та усунення похибки вимірювання температури потоку газу, є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

Вплив температурних умов роботи систем обліку природного газу на точність вимірювання його витрати та кількості досліджувався у роботах [86], [218]-[223], [253], [262]-[264], [267]. Зокрема в [86] наведено класифікацію додаткових похибок вимірювання температури газу та описано похибки, зумовлені теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою

трубопроводу, теплообміном стінки трубопроводу з повітрям, дроселюванням газу при протіканні через пристрій звуження потоку та ін. Однак у вказаних роботах не достатньо уваги приділено дослідженню динамічних характеристик термоперетворювачів у вузлах монтажу та їх впливу на точність вимірювання витрати та кількості газу під час коливань параметрів потоку (температури та витрати). Також у вказаних роботах не наведено порівняння результатів розрахунку похибок вимірювання температури газу із результатами експериментального дослідження цих похибок на теплогенеруючих об'єктах.

Метою цього підрозділу є дослідити вплив імпульсних режимів роботи систем обліку природного газу на точність вимірювання його витрати та кількості. Під імпульсним режимом розуміють такий режим роботи вузла обліку, коли мають місце переривання витрати газу, і при цьому амплітуди імпульсів витрати, а також тривалість імпульсів та пауз між ними можуть бути різними. Також поставлено за мету виконати експериментальне дослідження додаткової похибки вимірювання температури потоку газу та порівняти отримані експериментальні значення із розрахунковими значеннями вказаних похибок на базі розроблених математичних моделей [86], для встановлення можливості застосування розроблених математичних моделей на практиці.

3.3.2. Похибка обліку, зумовлена імпульсним режимом протікання газу

Для системи обліку природного газу, встановленої в приміщенні котельні, коли витрата газу в трубопроводі рівна нулю, температура газу в рівноважному стані дорівнює температурі навколишнього повітря в котельні. Вмикання водогрійного котла (чи іншої системи, що споживає газ) приводить до раптового зростання витрати газу до деякого номінального значення. При цьому температура потоку газу, який поступає зовні, поступово змінюється і досягає певного усталеного значення після завершення перехідного процесу. Під час динамічної зміни температури потоку газу виміряне значення термоперетворювачем буде дещо відрізнятись від дійсної температури внаслідок інерційності. Різниця між виміряним значенням температури та дійсною температурою потоку в перехідних режимах називається похибкою, зумовленою

інерційністю термоперетворювача (ΔT_{in}). Наявність похибки (ΔT_{in}) приводить до виникнення відповідних похибок вимірювання витрати (ΔF) та об'єму (ΔV) газу.

Вимикання водогрійного котла приводить до раптового припинення споживання газу і температура газу в трубопроводі поступово наближається до температури навколишнього повітря в котельні. При цьому виміряне значення температури газу буде відставати від дійсної температури газу внаслідок інерційності термоперетворювача і знову буде мати місце похибка (ΔT_{in}), але уже з протилежним знаком. Проте похибки ΔF та ΔV тут будуть відсутні, оскільки після припинення споживання газу витрата газу через систему обліку буде рівною нулю. Отже, інерційність термоперетворювача буде впливати на точність вимірювання витрати та об'єму газу лише під час вмикання подачі газу.

Для дослідження похибки ΔT_{in} в системі обліку природного газу розроблено її математичну модель із застосуванням закону збереження тепла та рівняння витрати газу для довгого трубопроводу з турбулентним режимом протікання на основі аналітичних залежностей з [157], [224]-[226], [254]-[259]. Спрощена схема встановлення лічильника газу для побудови моделі похибки ΔT_{in} представлена на рис.3.28.

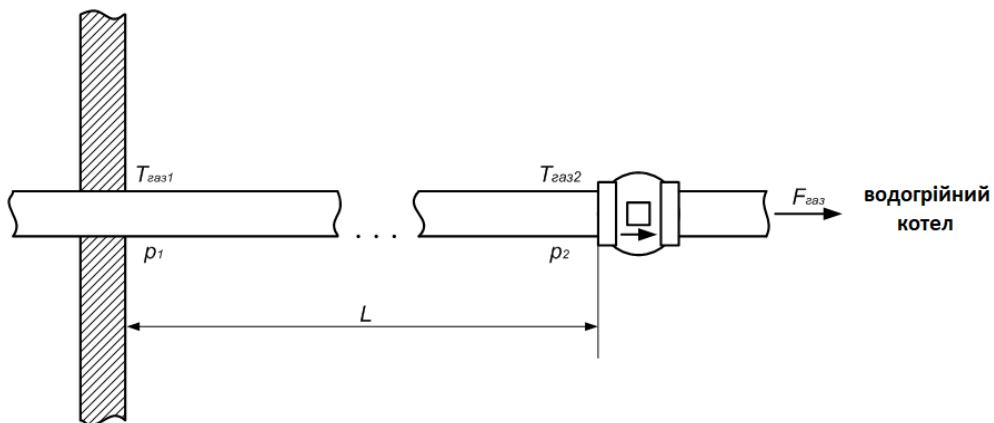


Рис.3.28. Спрощена схема встановлення лічильника газу.

Рівняння збереження тепла для газу, що протікає на ділянці трубопроводу перед системою обліку буде мати вигляд:

$$\frac{dq_T}{dt} = Q_{ВХ} - Q_{ВИХ} - Q_{ВТР}, \quad (3.35)$$

де q_T – кількість тепла в газі, що знаходиться у трубопроводі (Дж); $Q_{ВХ}$ – кількість тепла, що поступає з газом на вході трубопроводу (Дж/с); $Q_{ВИХ}$ – кількість тепла,

що виходить з газом на виході трубопроводу (Дж/с); $Q_{ВТР}$ – кількість тепла, що втрачається від потоку газу до навколишнього середовища через стінку трубопроводу (Вт).

Кількість тепла в газі, що знаходиться у трубопроводі, визначається за рівнянням:

$$q_T = m_{газ} \cdot c_{p.газ} \cdot T_{газ}, \quad (3.36)$$

де $m_{газ}$ – маса газу, що знаходиться в трубопроводі; $c_{p.газ}$ – питома теплоємність газу; $T_{газ}$ – температура газу на вимірювальній ділянці трубопроводу.

Кількість тепла, що поступає з газом на вході трубопроводу:

$$Q_{ВХ} = F_{mгаз} \cdot c_{p.газ} \cdot T_{газ1}, \quad (3.37)$$

де $F_{mгаз}$ – масова витрата газу; $T_{газ1}$ – температура газу на вході трубопроводу.

Кількість тепла, що виходить з газом на виході трубопроводу:

$$Q_{ВИХ} = F_{mгаз} \cdot c_{p.газ} \cdot T_{газ2}, \quad (3.38)$$

де $T_{газ2}$ – температура газу на виході трубопроводу.

Кількість тепла, що втрачається від потоку газу до навколишнього середовища через стінку трубопроводу:

$$Q_{ВТР} = K_L \cdot L \cdot (T_{газ} - T_{нов}), \quad (3.39)$$

де K_L – лінійний коефіцієнт теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря; L – довжина трубопроводу; $T_{нов}$ – температура навколишнього повітря.

Розрахунок лінійного коефіцієнта теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря K_L виконується відповідно до [224], [265], [266].

Прийmemo, що температура газу в трубопроводі рівна температурі газу на виході трубопроводу ($T_{газ} = T_{газ2}$), а густина газу по довжині трубопроводу під час моделювання не змінюється. Тоді об'ємна витрата газу в трубопроводі ($F_{газ}$) може бути описана рівнянням:

$$A \cdot \frac{dF_{газ}}{dt} + F_{газ}^2 = k^2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_{газ}}, \quad (3.40)$$

де A , k – коефіцієнти, що враховують конструктивні розміри трубопроводу; $\rho_{газ}$ – густина газу за робочих умов; p_1 – тиск газу на вході трубопроводу; p_2 – тиск газу на виході трубопроводу; $F_{газ}$ – об'ємна витрата газу за робочих умов.

Зведення об'ємної витрати газу до стандартних умов виконується відповідно до рівняння:

$$F_{с.газ} = F_{газ} \frac{\rho_{газ}}{\rho_{с.газ}}, \quad (3.41)$$

де $F_{с.газ}$ – витрата газу, зведена до стандартних умов; $\rho_{с.газ}$ – густина газу за стандартних умов.

Розрахунок густини газу за стандартних умов виконується згідно формули:

$$\rho_{газ} = \rho_{с.газ} \frac{p_{газ} \cdot T_c}{p_c \cdot T_{газ} \cdot K}, \quad (3.42)$$

де $p_{газ}$ – тиск газу за робочих умов; $T_{газ}$ – температура газу за робочих умов; $p_{с.газ}$ – тиск газу за стандартних умов (101325 Па, [226],[227]); $T_{с.газ}$ – температура газу за стандартних умов (293,15 К, [226],[227]); K – коефіцієнт стисливості природного газу.

Модель термоперетворювача може бути представлена у вигляді такого диференціального рівняння:

$$T_{TT} \frac{dT_{в.газ}}{dt} + T_{в.газ} = T_{газ2}, \quad (3.43)$$

де T_{TT} – стала часу термоперетворювача; $T_{в.газ}$ – вимірне значення температури газу.

Диференціальному рівнянню (3.43) відповідає наступна функція передачі:

$$W_{TT}(s) = \frac{1}{T_{TT} \cdot s + 1}, \quad (3.44)$$

де $W_{TT}(s)$ – функція передачі термоперетворювача; s – оператор Лапласа.

Розрахунок похибки ΔT_{in} здійснюється відповідно до формули:

$$\Delta T_{in} = T_{в.газ} - T_{газ2}. \quad (3.45)$$

Звівши рівняння (3.35)-(3.45) отримаємо математичну модель похибки ΔT_{in} із врахуванням температурного режиму газу в трубопроводі у вигляді такої системи рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_{газ} \cdot c_{p.газ} \frac{dT_{газ2}}{dt} = T_{газ1} \cdot c_{p.газ} \cdot F_{газ} \cdot \rho_{газ} - \\ - T_{газ2} \cdot c_{p.газ} \cdot F_{газ} \cdot \rho_{газ} - \\ - K_L \cdot L \cdot (T_{газ2} - T_{нов}); \\ A \frac{dF_{газ}}{dt} + F_{газ}^2 = k^2 \cdot \frac{p_1 - p_2}{\rho_{газ}}; \\ F_{с.газ} = F_{газ} \frac{\rho_{газ}}{\rho_{с.газ}}; \\ \rho_{газ} = \rho_{с.газ} \frac{p_{газ} \cdot T_c}{p_c \cdot T_{газ} \cdot K}; \\ T_{ТТ} \frac{dT_{в.газ}}{dt} + T_{в.газ} = T_{газ2}; \\ \Delta T_{in} = T_{в.газ} - T_{газ2}. \end{array} \right. \quad (3.46)$$

Математична модель (3.46) 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 (див. рис.3.32, 3.33). 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%.

Розроблена модель враховує конструктивні розміри вузла обліку газу, параметри потоку газу та динамічні характеристики термоперетворювача. Система рівнянь (3.46) може бути застосована для моделювання похибки ΔT_{in} у діапазоні тиску від 0,1 до 3 МПа, температури від -5 до 50 °С та витрати газу від 20 до 650 м³/год. Результати моделювання похибки ΔT_{in} для системи обліку на теплогенеруючому об'єкті представлені у підрозділі 5.3.

3.3.3. Похибки обліку, зумовлені теплообміном на вимірювальній ділянці трубопроводу

У тих випадках, коли має місце різниця температур потоку газу та навколишнього повітря у системі обліку природного газу виникають такі похибки: похибка, зумовлена теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу, похибка, зумовлена теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям, та похибка, зумовлена теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу.

Оскільки в умовах наявності різниці температур потоку газу і навколишнього повітря температура зануреного кінця гільзи термоперетворювача відрізняється від температури стінки трубопроводу, то в наслідок цього відбувається теплообмін між ними. Цей теплообмін відбувається двома шляхами: теплопровідністю (відтік або притік теплоти по корпусу гільзи термоперетворювача) та випромінюванням (оскільки є два тіла різної температури – занурений кінець гільзи термоперетворювача та внутрішня поверхня трубопроводу). В результаті аналізу даного теплообміну встановлено, що при температурах газового потоку, характерних для систем обліку на теплогенеруючих об'єктах, теплообмін випромінюванням має набагато меншу інтенсивність, ніж теплообмін теплопровідністю.

Теплообмін між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу має значний вплив на вимірне значення температури газу у випадку встановлення термоперетворювача у трубопроводах малих діаметрів, оскільки довжина зануреної частини термоперетворювача, а отже й віддаль чутливого елемента від стінки трубопроводу, тут є меншою.

Додаткова систематична похибка вимірювання температури потоку газу, зумовлена теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу (ΔT_T), являє собою різницю між фактичною температурою потоку газу в місці встановлення термоперетворювача та вимірним значенням

температури (без врахування метрологічних характеристик вимірювального перетворювача температури).

Величина похибки ΔT_T залежить від таких факторів, як різниця температур газу та навколишнього повітря, витрата і тиск (густина) газу в трубопроводі, товщина стінки гільзи термоперетворювача та глибина занурення термоперетворювача в трубопровід.

Похибку вимірювання температури потоку газу, зумовлену теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу (ΔT_T) досліджено на діючому вузлі обліку природного газу на базі роторного лічильника газу (див. рис.3.29). Для проведення експерименту застосовано два термоперетворювачі, встановлені співвісно в одному перерізі трубопроводу (ТП1 і ТП2, див. рис. 3.30). Термоперетворювач ТП1 встановлено прямо в потік без захисної гільзи, а термоперетворювач ТП2 встановлено у захисну гільзу, вварену у стінку трубопроводу. Параметри експериментальної установки для дослідження похибки ΔT_T представлені у табл. 3.8.

Виміряне значення температури термоперетворювачем ТП1 становить $+24,06$ °С, а термоперетворювачем ТП2 – $+22,05$ °С. Таким чином, експериментальне значення похибки ΔT_T становить $22,05 - 24,06 = -2,01$ °С.



Рис.3.29. Вузол обліку природного газу із встановленими термоперетворювачами для дослідження похибки ΔT_T .

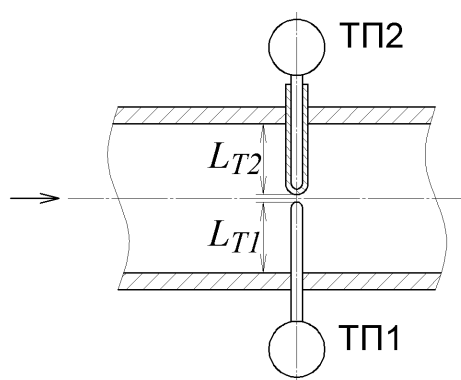


Рис.3.30. Схема встановлення термоперетворювачів для дослідження похибки ΔT_T .

Таблиця 3.8

Параметри вузла обліку природного газу для експериментального дослідження похибки ΔT_T

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення
<i>Параметри середовища</i>		
Тип середовища	-	природний газ
Абсолютний тиск	кПа	381,3
Температура (виміряна термоперетворювачем ТП1)	°С	+24,06
Витрата, приведена до стандартних умов	м ³ /год	14,5
<i>Параметри трубопроводу</i>		
Внутрішній діаметр трубопроводу	мм	80
Зовнішній діаметр трубопроводу	мм	88
<i>Параметри термоперетворювача ТП2</i>		
Зовнішній діаметр гільзи ТП2	мм	18
Внутрішній діаметр гільзи ТП2	мм	6,5
Температура (виміряна термоперетворювачем ТП2)	°С	+22,05
<i>Параметри навколишнього повітря</i>		
Температура повітря	°С	+19,14

Після застосування розробленої математичної моделі [86] для розрахунку похибки ΔT_T для вузла вимірювання з параметрами згідно експериментальної установки було отримано значення $\Delta T_T = -2,22$ °С (див. табл. 3.9). З отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблена математична модель похибки ΔT_T дає результати розрахунку, співмірні із експериментальними значеннями, тому може бути застосована на практиці для розрахунку похибки, зумовленої теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу.

Таблиця 3.9

Результати розрахунку похибки ΔT_T та порівняння з експериментальним значенням

Назва параметра	Умовн. познач., розмірн.	Значення параметра
Середня швидкість газу в трубопроводі	v_z , м/с	0,21
Число Рейнольдса для газу в трубопроводі	Re	4031
Питомий тепловий потік на одиницю довжини трубопроводу	dQ/dl , Вт/м	-3,30
Температура внутрішньої поверхні стінки трубопроводу	$T_{ст.внутр}$, °C	+21,922
Температура зовнішньої поверхні стінки трубопроводу	$T_{ст.зовн}$, °C	+21,920
Розрахункове значення похибки	ΔT_T , °C	-2,22
Експериментальне значення похибки	ΔT_T , °C	-2,01

Внаслідок теплообміну між потоком газу та навколишнім повітрям через стінку трубопроводу температура газу по довжині трубопроводу змінюється (наближається до температури навколишнього повітря), тому температура газу в місці встановлення термоперетворювача відрізняється від температури газу в місці встановлення лічильника газу або пристрою звуження потоку (ПЗП). Ця різниця температур являє собою похибку вимірювання температури потоку газу, зумовлену теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям (ΔT_x). Величина похибки ΔT_x крім таких факторів впливу як різниця температур газу та навколишнього повітря, витрата і тиск газу, суттєво залежить від місця встановлення термоперетворювача (відстані між термоперетворювачем і ПЗП).

Похибку вимірювання температури потоку газу, зумовлену теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям (ΔT_x) досліджено діючому вузлі обліку природного газу на базі методу змінного перепаду тиску. Для проведення експерименту застосовано два термоперетворювачі (ТП1 і ТП2, див. рис.3.31), встановлені на відстані 14,14 м один від одного. Параметри вузла обліку природного газу для експериментального дослідження похибки ΔT_x представлені у табл.3.10.

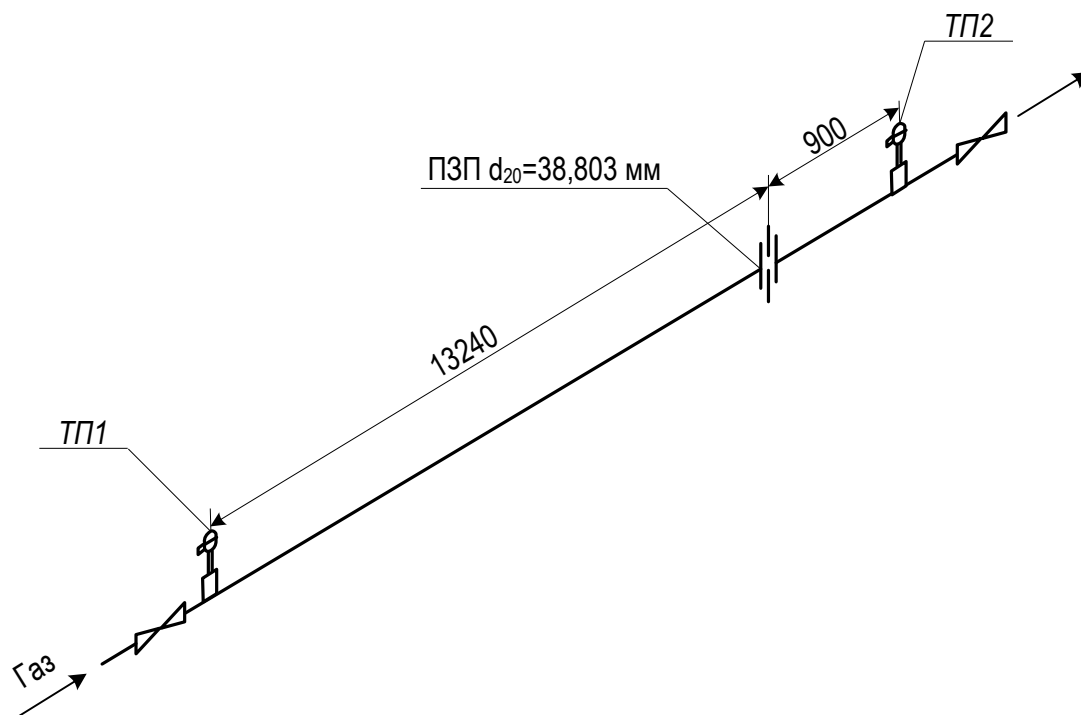


Рис.3.31. Схема вузла обліку природного газу для дослідження похибки ΔT_x

Таблиця 3.10

Параметри вузла обліку природного газу для експериментального дослідження похибки ΔT_x

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення
<i>Параметри середовища</i>		
Тип середовища	-	природний газ
Абсолютний тиск	кПа	357,23
Температура (виміряна термоперетворювачем ТП1)	°С	+2,5
Температура (виміряна термоперетворювачем ТП2)	°С	+5,0
Витрата, приведена до стандартних умов	м ³ /год	477,48
<i>Параметри трубопроводу</i>		
Внутрішній діаметр трубопроводу	мм	102,01
<i>Параметри навколишнього повітря</i>		
Температура повітря	°С	+12,0

Вимірне значення температури газу термоперетворювачем ТП1 становить $+2,5$ °С. Таким чином, експериментальне значення похибки ΔT_x становить $5,0 - 2,5 = +2,5$ °С.

Для термоперетворювача ТП2 (рис.3.10) має місце додаткова похибка вимірювання температури, зумовлена дроселюванням газу при його протіканні через ПЗП ($\Delta T_{др}$). При максимальній витраті газу для досліджуваного вузла ($1663,9$ м³/год в с.у.) значення похибки $\Delta T_{др}$ становить $-0,17$ °С, а при витраті $477,48$ м³/год в с.у. (при якій виконувався експеримент) значення похибки $\Delta T_{др}$ становить $-0,01$ °С. Оскільки значення похибки $\Delta T_{др}$ під час експерименту було незначним, то нею можна знехтувати.

Після застосування розробленої математичної моделі [48] для розрахунку похибки ΔT_x для вузла обліку з параметрами згідно експериментальної установки було отримано значення $\Delta T_x = +2,74$ °С (див. табл. 3.11). З отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблена математична модель похибки ΔT_x дає результати розрахунку, співмірні із експериментальними значеннями, тому може бути застосована на практиці для розрахунку похибки, зумовленої теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям.

Таблиця 3.11

Результати розрахунку похибки ΔT_x та порівняння з експериментальним значенням

Назва параметра	Умовн. познач., розмірн.	Значення параметра
Середня швидкість газу в трубопроводі	v_z , м/с	4,34
Число Рейнольдса для газу в трубопроводі	Re	108029
Питомий тепловий потік на одиницю довжини трубопроводу	dQ/dl , Вт/м	+11,30
Розрахункове значення похибки	ΔT_x , °С	+2,74
Експериментальне значення похибки	ΔT_x , °С	+2,5

При протіканні газу через роторний лічильник температура газу змінюється внаслідок інтенсивних теплообмінних процесів у камері лічильника. Зміна температури може сягати 5-6 °С. Тому місце встановлення термоперетворювача в системі обліку (до, чи після лічильника) може мати суттєвий вплив на вимірне значення температури потоку газу і, як наслідок, на вимірне значення об'єму газу.

З метою дослідження зміни температури газу після протікання через роторний лічильник, тобто відхилення температури газу на виході лічильника від його температури на вході ($\Delta T_{ЛГ}$), розроблено математичну модель відхилення $\Delta T_{ЛГ}$ із застосуванням результатів експериментальних досліджень.

Експериментальне дослідження теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника виконано на установці з роторним лічильником, через який пропускали повітря. Схема лічильника газу із встановленими до і після нього термоперетворювачами показана на рис. 3.32.

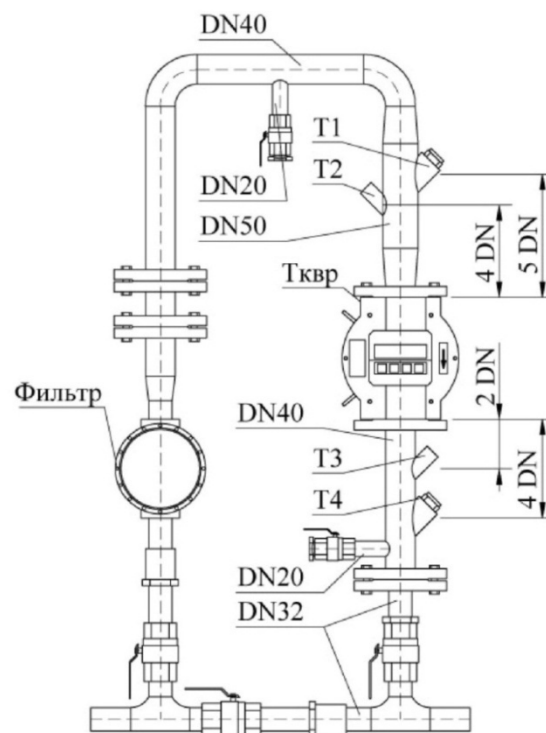


Рис.3.32. Схема експериментальної установки для дослідження теплообміну між повітрям та корпусом лічильника.

Для проведення експерименту застосовано такі термоперетворювачі:

- термоперетворювач $T1$, встановлений в термоізолювану гільзу до лічильника на відстані $5D$;
- термоперетворювач $T2$, встановлений в звичайну гільзу до лічильника на відстані $4D$;
- термоперетворювач $T3$, встановлений в звичайну гільзу після лічильника на відстані $2D$;
- термоперетворювач $T4$, встановлений безпосередньо в газ після лічильника на відстані $4D$;
- термоперетворювач $T_{квр}$, вмонтований в корпус лічильника з теплоізоляційною вставкою на вході лічильника.

Для порівняння експериментальних результатів було обрано термоперетворювачі $T2$ та $T3$, оскільки вони встановлені з однаковим способом монтажу відповідно до та після лічильника. Експериментальні значення виміряних температур перетворювачами $T_{квр}$, $T1...T4$ показані на рис. 3.33.

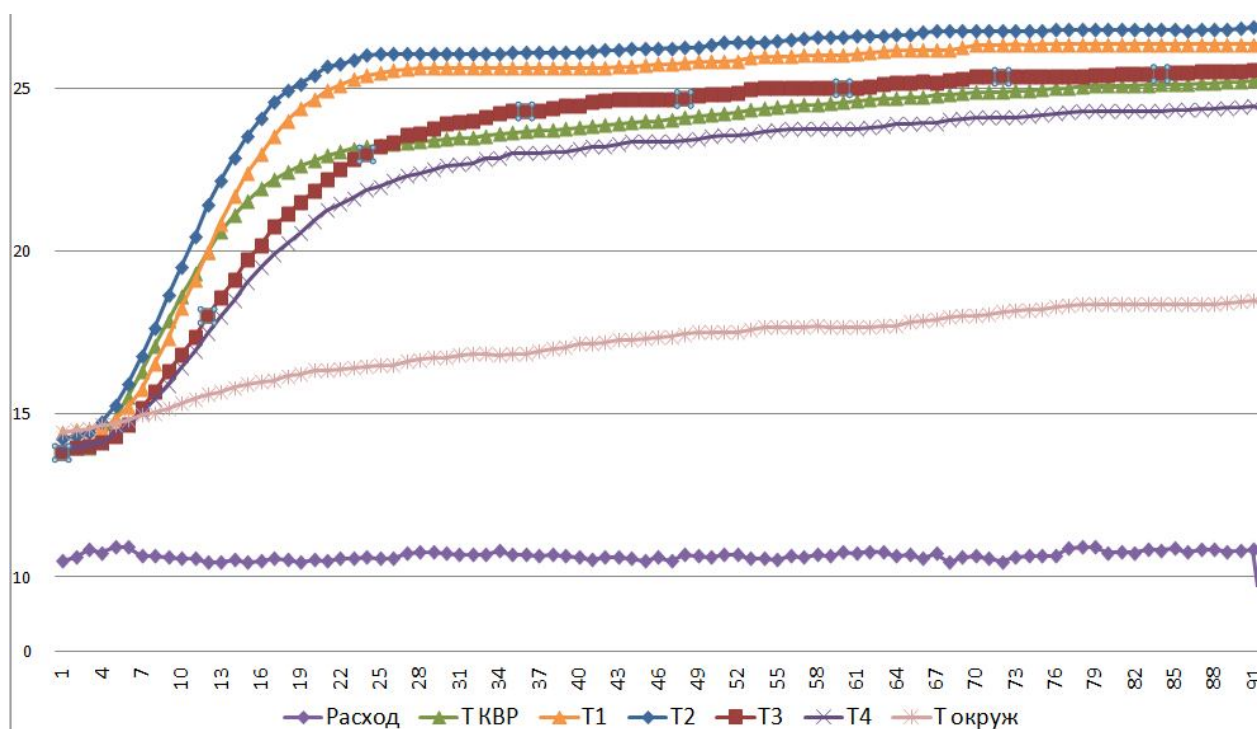


Рис. 3.33. Експериментальні значення виміряних температур перетворювачами $T_{квр}$, $T1...T4$.

Для отримання експериментального значення відхилення $\Delta T_{ЛГ}$, температура газу до лічильника та після лічильника була визначена в усталеному режимі, в момент часу 90 хв після початку експерименту. Параметри експериментальної установки та основні експериментальні значення представлені у таблиці 3.12.

Таблиця 3.12

Параметри експериментальної установки для дослідження теплообміну між потоком повітря та корпусом лічильника

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення
<i><u>Параметри потоку</u></i>		
Тип середовища	-	Повітря
Абсолютний тиск	кПа	100
Температура (виміряна термоперетворювачем T2)	°С	26,86
Температура (виміряна термоперетворювачем T3)	°С	25,52
Витрата приведена до стандартних умов	м ³ /год	10,83
<i><u>Параметри навколишнього повітря</u></i>		
Температура повітря	°С	18,46
<i><u>Параметри лічильника газу</u></i>		
Конструктивні розміри (ДхШхВ)	мм	168x268x190
<i><u>Параметри трубопроводу</u></i>		
Внутрішній діаметр трубопроводу до та після лічильника	мм	34

Із наведених даних у таблиці 3.12 видно, що експериментальне значення похибки $\Delta T_{ЛГ} (T3-T2)$ становить -1,34 °С.

Ще одне експериментальне дослідження теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника виконано на реальному об'єкті з роторним лічильником, який обліковує природний газ. Схема лічильника газу із встановленими термоперетворювачами показана на рис. 3.34.

Експериментальні дослідження були виконані в умовах, коли температура газу була вища за температуру навколишнього повітря (умови 1), а також в умовах, коли температура газу була нижча за температуру навколишнього повітря (умови 2).

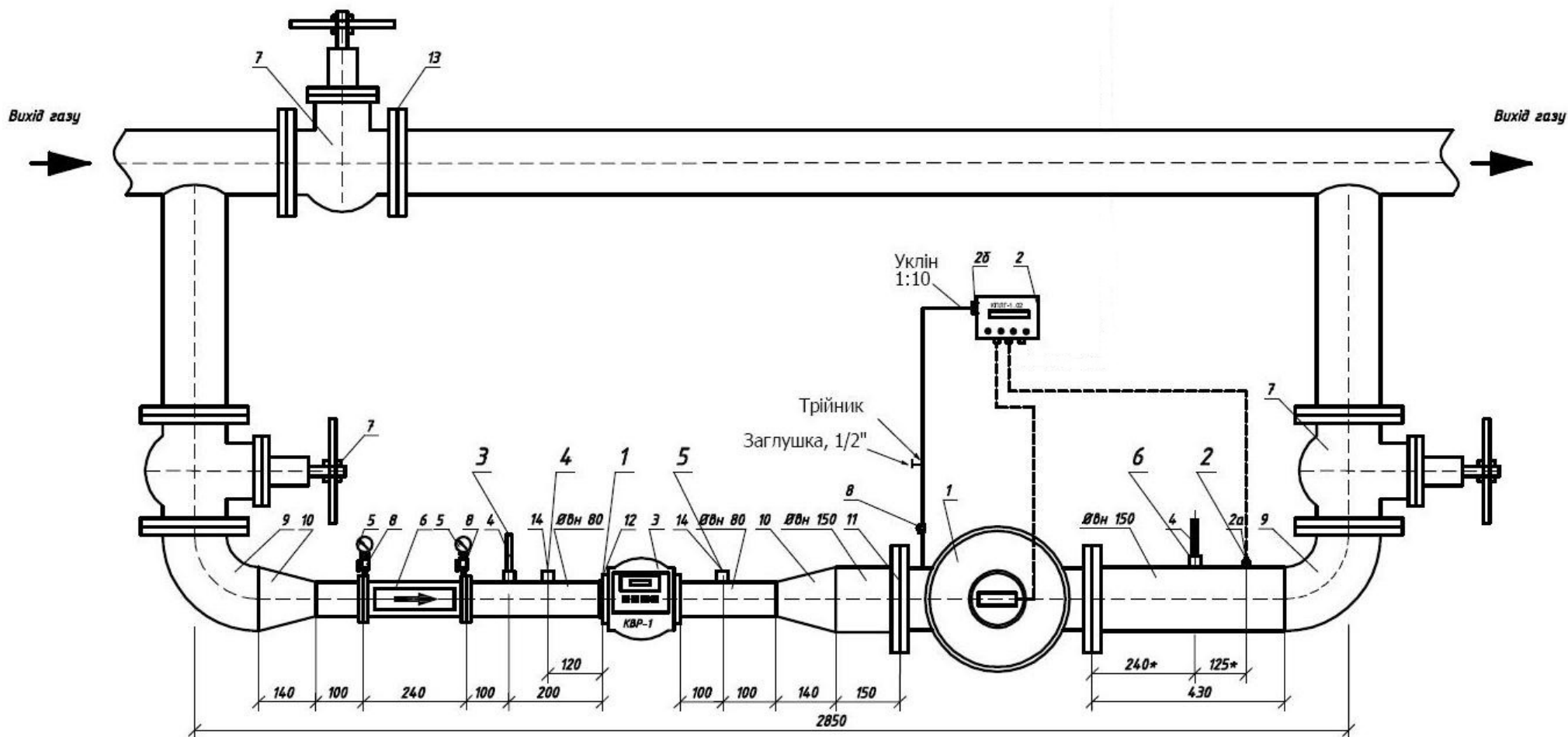


Рис.3.34. Схема експериментальної установки для дослідження теплообміну між потоком природного газу та корпусом лічильника.

Позначення до схеми на рис. 3.34.

Поз	Позначення	Найменування	Кіл.
1	DELTA 2150/650 G400	Лічильник газу роторний	1
2		Корректор КПЛГ-1.02	1
2а		Термоперетворювач опору Pt1000 в складі коректора $L_{роб}=100$ мм, \varnothing 6мм, $\alpha=90^\circ$, $L_{занур}=600$ мм	1
2б		Датчик абсолютного тиску 0,5 МПа	1
3	КВР-1 G250	Комплекс вимірювальний роторний	1
4	ТТЖ	Термометр технічний $-30\dots+50^\circ\text{C}$	2
5	НМП-100	Напоромір тех. показуючий 0-5 кПа	2
6	ФГ-80-0.63-Р	Фільтр газовий Ду80	1
7		Кран кульовий Ду150	3
8		Кран кульовий Ду15	3
9	ГОСТ 17375-83	Відвід 90° Ду150	2
10	ГОСТ 17378-83	Перехід 150x80	2
11		Фільтр сітчастий Ду150	1
12	ААКИ	Фільтр сітчастий Ду80	1
13		Блінда Ду150	1
14		Бобишка під термометр технічний	1

На вимірювальній ділянці встановлено такі термоперетворювачі:

T1 – термоізолюваний термоперетворювач, встановлений безпосередньо в газ (входить у склад вимірювального комплексу КВР–1);

T2 – звичайний термоперетворювач, встановлений безпосередньо в газ;

T3 – термоізолюваний термоперетворювач, встановлений до лічильника газу на відстані 200 мм;

T4 – звичайний термоперетворювач із глухою гільзою, встановлений перед лічильником газу на відстані 120мм;

T5 – звичайний термоперетворювач із глухою гільзою, встановлений після лічильника газу на відстані 100 мм;

T6 – рідинний термометр із глухою гільзою, встановлений після лічильника газу.

Для порівняння експериментальних результатів було обрано термоперетворювачі $T4$ та $T5$, оскільки вони встановлені з однаковим способом монтажу відповідно до та після досліджуваного лічильника газу КВР-1.

Параметри експериментальної установки та основні експериментальні значення представлені у таблиці 3.14.

Таблиця 3.14

Параметри експериментальної установки та основні експериментальні значення

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення	
		Умови 1	Умови 2
<u>Параметри середовища</u>			
Тип середовища	-	природний газ	
Абсолютний тиск	кПа	380	
Температура природного газу	°С	+34,6	+19,04
Температура (термометр $T4$)	°С	+33,2	+23,85
Температура (термометр $T5$)	°С	+32,61	+25,38
Витрата, приведена до стандартних умов	м ³ /год	112,00	110,00
<u>Параметри навколишнього повітря</u>			
Температура повітря	°С	+30,51	+27,04
Швидкість руху повітря	м/с	0	
<u>Параметри лічильника газу</u>			
Конструктивні розміри (ДхШхВ)	мм	509x232x240	
<u>Параметри трубопроводу</u>			
Внутрішній діаметр трубопроводу	мм	72	

Із результатів експериментального дослідження на природному газі видно, що в умовах 1 ($T_{газ} > T_{нов}$) температура газу на вході лічильника становить $T4=33,2$ °С, а на виході лічильника $T5=32,61$ °С. Зміна температури газу після протікання через роторний лічильник становить $T5-T4=-0,59$ °С (газ охолодився). А в умовах 2 ($T_{газ} < T_{нов}$) температура газу на вході лічильника становить $T4=23,85$ °С, а на виході лічильника $T5=25,38$ °С. Зміна температури газу після протікання через роторний лічильник становить $T5-T4=1,53$ °С (газ нагрівся).

Для виведення рівняння зміни температури газу при протіканні через роторний лічильник газу приймемо, що газ поступає на вхід лічильника з температурою $T_{газ1}$, а виходить – з температурою $T_{газ2}$ (див. рис. 3.35). Зміна температури газу після протікання через лічильник зумовлена теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника, внаслідок різниці температур потоку газу та навколишнього повітря.

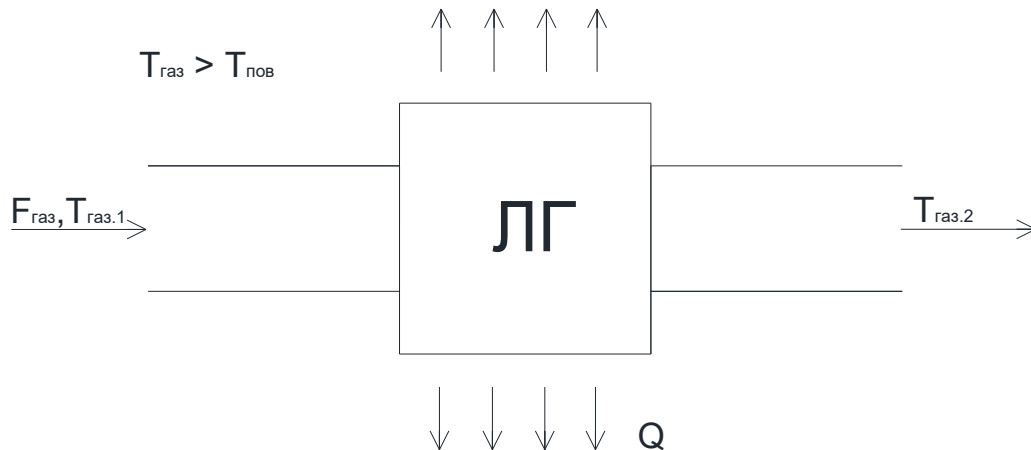


Рис.3.35. Схема протікання газу та теплопередачі через корпус лічильника.

Втрата теплоти від зовнішньої поверхні корпусу лічильника в навколишнє середовище за одиницю часу рівна [224]:

$$dQ = K \cdot dS \cdot (T_{газ} - T_{нов}) , \quad (3.47)$$

де K – коефіцієнт теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря через стінку корпусу лічильника, $Вт/(м^2 \cdot К)$; $T_{нов}$ – температура навколишнього повітря, $К$; $T_{газ}$ – температура природного газу в лічильнику, $К$; S – площа зовнішньої поверхні корпусу лічильника, $м^2$.

Після протікання через лічильник газ охолodиться і втратить теплоту [224]:

$$dQ = -F_{m.газ} \cdot C_{p.газ} \cdot dT_{газ} , \quad (3.48)$$

де $F_{m.газ}$ – масова витрата газу через лічильник, $кг/с$; $C_{p.газ}$ – ізобарна теплоємність газу за робочих умов, $Дж/(кг \cdot К)$;

Рівняння теплового балансу буде мати вигляд:

$$K \cdot dS \cdot (T_{газ} - T_{нов}) = -F_{m,газ} \cdot C_{p,газ} \cdot dT_{газ}. \quad (3.49)$$

Розділивши змінні та проінтегрувавши рівняння (3.49) по площі зовнішньої поверхні лічильника газу від 0 до S і по температурі від $T_{газ1}$ до $T_{газ2}$ отримаємо:

$$\ln \left(\frac{T_{газ1} - T_{нов}}{T_{газ2} - T_{нов}} \right) = \frac{K \cdot S}{F_{m,газ} \cdot C_{p,газ}}, \quad (3.50)$$

де $T_{газ1}$ – температура газу на вході лічильника, К; $T_{газ2}$ – температура газу на виході лічильника, К.

З рівняння (3.50) отримуємо формулу для розрахунку температури газу на виході лічильника:

$$T_{газ2} = T_{нов} + (T_{газ1} - T_{нов}) \cdot e^{-\frac{K \cdot S}{F_{m,газ} \cdot C_{p,газ}}}. \quad (3.51)$$

Похибка, зумовлена теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника визначається за формулою:

$$\Delta T_{ЛГ} = T_{газ2} - T_{газ1}. \quad (3.52)$$

Підставивши (3.51) в (3.52) отримаємо рівняння розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$:

$$\Delta T_{ЛГ} = (T_{нов} - T_{газ1}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot S}{F_{m,газ} \cdot C_{p,газ}}} \right). \quad (3.53)$$

Основним параметром, який потрібно визначити для розрахунку $\Delta T_{ЛГ}$ є коефіцієнт теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря через стінку лічильника (K). Тут є можливі таких два способи:

1). Розрахувати K для лічильника газу із застосуванням критеріальних рівнянь для усіх відомих видів конвективного теплообміну між потоком газу і поверхнею, а після цього вибрати таке рівняння, яке дає результат розрахунку $\Delta T_{ЛГ}$ найближчий до експериментального значення. Вибране рівняння ляже в основу розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ для будь-якого лічильника.

2). Розрахувати K для конвективного теплообміну при протіканні газу прямолінійною ділянкою трубопроводу, після чого визначити таке значення

довжини трубопроводу, яке б давало значення $\Delta T_{ЛГ}$ рівне експериментальному значенню різниці температур газу на вході та на виході лічильника. Встановити кореляційну залежність між довжиною трубопроводу та коефіцієнтом теплопередачі K , яка ляже в основу розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ для будь-якого лічильника.

Результати розрахунку коефіцієнта теплопередачі K згідно першого способу представлено нижче.

З метою виконання розрахунків для різних режимів протікання газу через лічильник при визначенні коефіцієнта теплопередачі K за першим способом та для порівняння результатів розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ із експериментальними значеннями цієї похибки застосовано критеріальні рівняння дев'яти різних видів теплопередачі.

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі від потоку газу до внутрішньої поверхні корпусу лічильника газу здійснено на основі критеріальних рівнянь визначення числа Нусельта для таких режимів протікання газу [224]:

1. *Тепловіддача під час поздовжнього обтікання пластини.*

$$Nu = 0,33 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}, \quad (3.54)$$

де Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля.

2. *Тепловіддача під час течії газу в прямих трубах або каналах.*

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \varepsilon_l, \quad (3.55)$$

де ε_l – поправковий коефіцієнт, який враховує вплив на середній коефіцієнт тепловіддачі відношення довжини труби до її діаметру.

3. *Тепловіддача під час течії газу в кільцевому каналі теплообмінника типу «труба в трубі».*

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot (D_e/d_3)^{0,45}, \quad (3.56)$$

де D_e – внутрішній діаметр зовнішньої труби; d_3 – зовнішній діаметр внутрішньої

труби, яка омивається теплоносієм ззовні; $Re = \frac{w \cdot d_e}{\eta}$ – число Рейнольдса; $w =$

$\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot (D_e^2 - d_3^2)}$ – швидкість руху газу, м/с; $d_e = (D_B - d_3)$ – еквівалентний діаметр, м;

4. *Тепловіддача під час поздовжнього обтікання пучка гладких труб.*

$$Nu = C \cdot d_e \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,23}, \quad (3.57)$$

де C – дослідний розмірний коефіцієнт, 1/м. $d_e = \frac{D_6^2 - n \cdot d_3^2}{D_6^2 + n \cdot d_3^2}$ – еквівалентний діаметр, м; D_6 – внутрішній діаметр зовнішньої труби (корпусу лічильника), м; d_3 – зовнішній діаметр трубок, м; n – кількість трубок; $Re = \frac{w \cdot d_3 \cdot \rho}{\eta}$ – число Рейнольдса; $w = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \rho \cdot (D_6^2 - n \cdot d_3^2)}$ – швидкість руху газу, м/с.

5. *Тепловіддача під час поперечного обтікання одиної гладкої труби.*

$$Nu = (0,43 + C \cdot Re^n \cdot Pr^{0,38}) \cdot \varepsilon_\phi, \quad (3.58)$$

де ε_ϕ – враховує кут атаки між напрямом течії потоку і віссю труби.

6. *Тепловіддача під час поперечного обтікання пучка гладких труб за шахового розташування труб.*

$$Nu = 0,41 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_\phi. \quad (3.59)$$

7. *Тепловіддача під час поперечного обтікання пучка гладких труб за коридорного розташування труб.*

$$Nu = 0,26 \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,36} \cdot \varepsilon_\phi. \quad (3.60)$$

8. *Тепловіддача під час обтікання пучка труб з поперечними ребрами за шахового розташування труб.*

$$Nu = 0,26 \cdot (d_3/t)^{-0,54} \cdot (h/t)^{-0,14} \cdot Re^{0,65} \cdot Pr^{0,4}, \quad (3.61)$$

де d_3 – зовнішній діаметр несучої труби, м; t – крок ребер, м; $h = \frac{D - d_3}{2}$ – висота ребра, м; D – зовнішній діаметр оребрєння, м.

9. *Тепловіддача під час обтікання пучка труб з поперечними ребрами за коридорного розташування труб.*

$$Nu = 0,116 \cdot (d_s/t)^{-0,54} \cdot (h/t)^{-0,14} \cdot Re^{0,72} \cdot Pr^{0,4} . \quad (3.62)$$

Шляхом підстановки критеріальних рівнянь розрахунку критерію Нуссельта (3.54)-(3.62) при визначенні коефіцієнта теплопередачі (K) від потоку газу до навколишнього повітря через корпус лічильника було розраховано значення похибки $\Delta T_{ЛГ}$ для вказаних вище дев'яти режимів протікання. Порівняння розрахованих значень похибки $\Delta T_{ЛГ}$ з експериментальними значеннями було здійснене для діючого вузла обліку природного газу, схема якого зображена на рис.3.34. Графічне порівняння для умов 1 ($T_{газ} > T_{нов}$) наведене на рис. 3.36, а для умов 2 ($T_{газ} < T_{нов}$) – на рис.3.37.

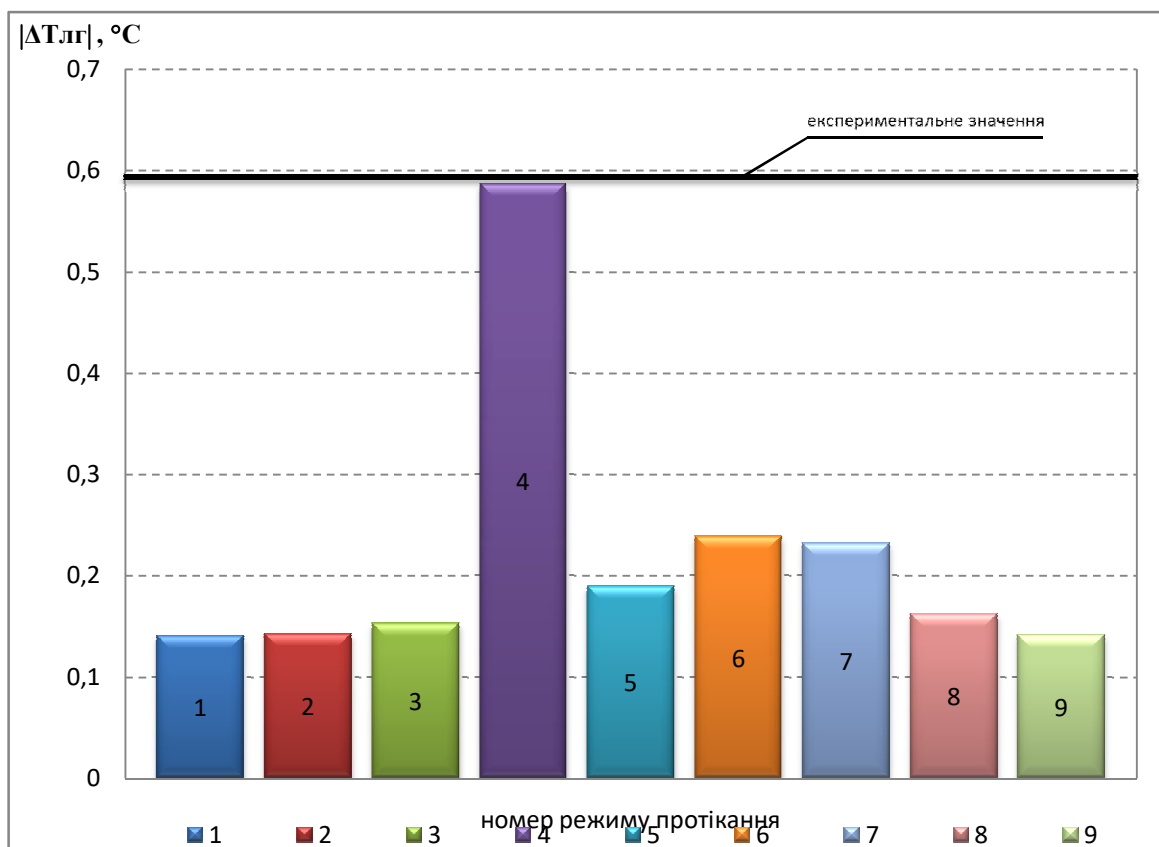


Рис.3.36. Порівняння розрахованих значень похибки $\Delta T_{ЛГ}$ з експериментальним значенням для діючого вузла обліку природного газу в умовах 1.

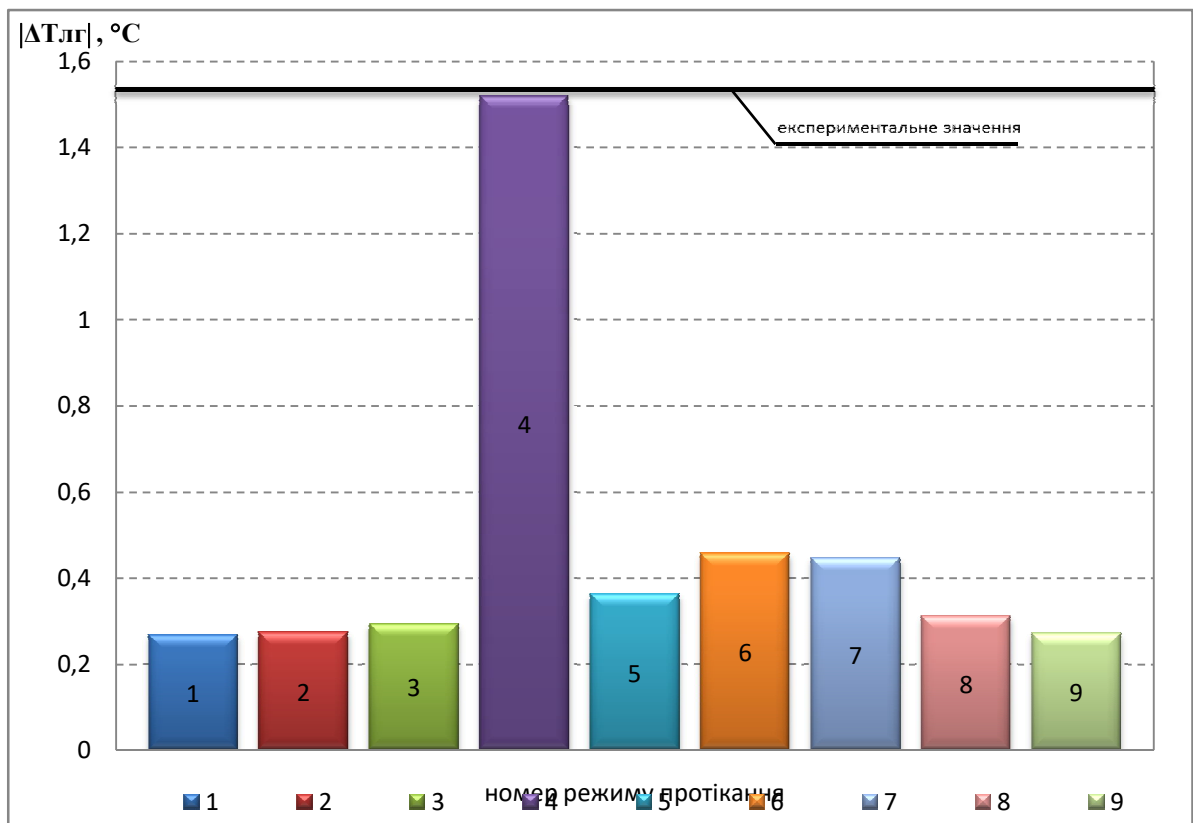


Рис.3.37. Порівняння розрахованих значень похибки $\Delta T_{ЛГ}$ з експериментальним значенням для діючого вузла обліку природного газу в умовах 2.

Із рис.3.36 та 3.37 видно, що найближче до експериментального значення похибки $\Delta T_{ЛГ}$ дає рівняння, яке описує тепловіддачу під час поздовжнього обтікання пучка гладких труб (режим 4). Тому це рівняння найкраще підходить для розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ згідно першого способу.

Необхідно зазначити, що у першому способі визначення K є ряд недоліків, найголовніший з яких полягає у складності вибору параметрів пучка труб (конструктивні розміри, кількість труб) для виконання розрахунку. Тому пропонується виконувати розрахунок K згідно другого способу.

У другому способі розрахунку роторний лічильник умовно замінюється на прямолінійну ділянку трубопроводу, на якій відбувається еквівалентна зміна температури газу, як при протіканні через роторний лічильник. При цьому коефіцієнт теплопередачі K розраховується на основі критеріальних рівнянь для конвективного теплообміну при протіканні газу довгою прямолінійною ділянкою трубопроводу [224].

Враховуючи те, що при розрахунку теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря на прямолінійній ділянці трубопроводу застосовується лінійний коефіцієнт теплопередачі (K_l), рівняння розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ прийме вигляд

$$\Delta T_{ЛГ} = (T_{нов} - T_{газ1}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_l \cdot L}{F_{m,газ} \cdot c_{p,газ}}} \right). \quad (3.63)$$

де K_l – лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·К); L – довжина прямолінійної ділянки трубопроводу, м.

Тепер постає завдання визначення довжини трубопроводу (L), яку слід підставляти у формулу (3.63) при розрахунку $\Delta T_{ЛГ}$. Для цього пропонується встановити кореляційний зв'язок між довжиною трубопроводу L та одним з параметрів системи, через яку протікає газ. Найбільш доцільно у якості корельованого параметру обрати коефіцієнт теплопередачі (K_l), оскільки він враховує як конструктивні розміри системи, так і параметри потоку газу.

Для розроблення кореляційної залежності між L та K_l з формули (3.63) виразимо L :

$$L = -\frac{F_{m,газ} \cdot c_{p,газ}}{K_l} \cdot \ln \left(1 - \frac{\Delta T_{ЛГ}}{T_{нов} - T_{газ1}} \right). \quad (3.64)$$

Для експериментальних значень похибки $\Delta T_{ЛГ}$ було розраховано еквівалентну довжину трубопроводу (L) за формулою (3.64) та переведено у відносну довжину трубопроводу згідно формули

$$L_6 = \frac{L}{D}, \quad (3.65)$$

де D – внутрішній діаметр трубопроводу на вході роторного лічильника, м.

Результати розрахунку відносної довжини L_6 та лінійного коефіцієнта теплопередачі K_l для експериментальних значень $\Delta T_{ЛГ}$ представлені у табл.3.15.

Таблиця 3.15

Результати розрахунку L_6 та K_l для експериментальних значень $\Delta T_{ЛГ}$

$\Delta T_{ЛГ}, ^\circ\text{C}$	-1,34	-0,59	1,53
$K_l, \text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$	0,5603	1,0808	1,1888
L_6	32,4706	95,9633	115,0409

Отримані значення L_6 та K_l були апроксимовані такою кореляційною залежністю:

$$L_6 = 86,9696 \cdot K_l^2 - 20,7417 \cdot K_l + 16,7893. \quad (3.66)$$

Результат апроксимації представлено у графічній формі на рис.3.38.

Підставивши (3.66) та (3.65) у (3.63) отримаємо зведену формулу для розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$:

$$\Delta T_{ЛГ} = (T_{нов} - T_{газ1}) \cdot \left(1 - e^{\frac{D \cdot (86,9696 \cdot K_l^3 - 20,7417 \cdot K_l^2 + 16,7893 \cdot K_l)}{F_{м.газ} \cdot c_{р.газ}}} \right). \quad (3.67)$$

Формула (3.67) може бути застосована на практиці для розрахунку різниці температур газу на вході та на виході роторного лічильника у випадку встановлення термоперетворювача на вході лічильника (коли відомо $T_{газ1}$).

В тому випадку, коли термоперетворювач встановлений на виході лічильника, похибка $\Delta T_{ЛГ}$ може бути розрахована за формулою:

$$\Delta T_{ЛГ} = (T_{нов} - T_{газ2}) \cdot \left(e^{\frac{D \cdot (86,9696 \cdot K_l^3 - 20,7417 \cdot K_l^2 + 16,7893 \cdot K_l)}{F_{м.газ} \cdot c_{р.газ}}} - 1 \right). \quad (3.68)$$

Формула (3.68) отримана шляхом виділення $T_{газ1}$ з (3.51) та подальшою підстановкою у (3.52). Формули (3.67) та (3.68) можуть бути застосовані для розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ у діапазоні тиску від 0,1 до 3 МПа, температури від -5 до 50 $^\circ\text{C}$ та витрати газу від 20 до 650 $\text{м}^3/\text{год}$.

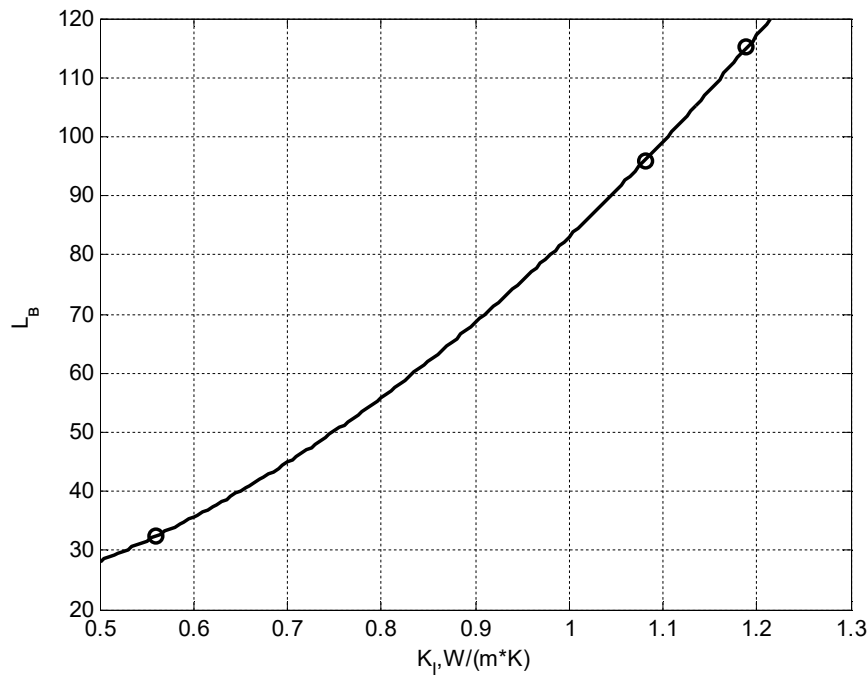


Рис.3.38. Апроксимація експериментальних точок залежності L_e від K_l за допомогою формули (3.66)

Відносна невизначеність формул (3.67) та (3.68) для розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ визначається невизначеністю розрахунку коефіцієнта теплопередачі від потоку газу до навколишнього повітря, яка не перевищує 15%.

Застосування розробленої моделі зміни температури газу при протіканні через роторний лічильник дасть можливість визначати вплив місця встановлення термоперетворювача (до, чи після лічильника) на точність вимірювання температури потоку газу.

Приклад розрахунку похибки $\Delta T_{ЛГ}$ для діючого вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника представлено нижче.

Для діючого вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника (див. рис. 3.39) виконано розрахунок похибки $\Delta T_{ЛГ}$ в зимових умовах роботи та літніх умовах роботи. Цей вузол обліку встановлено у шафі на відкритому повітрі. Вимірювальний перетворювач температури встановлений на виході роторного лічильника. Параметри вузла обліку наведені в таблиці 3.16. Для цього вузла обліку розраховано значення лінійного коефіцієнта теплопередачі K_l , похибки $\Delta T_{ЛГ}$ (за формулою (3.68)) та температури газу на вході лічильника. Результати розрахунку наведені в таблиці 3.17.



Рис. 3.39. Діючий вузол обліку природного газу на базі роторного лічильника

Із отриманих результатів видно, що в зимових умовах роботи, коли температура газу є на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ вищою за температуру навколишнього повітря, після протікання через роторний лічильник температура газу знизилась на $1,1242\text{ }^{\circ}\text{C}$. В літніх умовах роботи, коли температура газу є на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ нижчою за температуру навколишнього повітря, після протікання через роторний лічильник температура газу зросла на $1,1671\text{ }^{\circ}\text{C}$. Оскільки для приведення виміряного об'єму газу до стандартних умов необхідно мати значення температури газу в тому перерізі трубопроводу, де вимірюється тиск газу, тобто на вході лічильника, то отримані значення зміни температури газу при протіканні через роторний лічильник є систематичними похибками вимірювання температури газу, які приводять до відповідних похибок вимірювання об'єму газу.

Таблиця 3.16

Параметри діючого вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника

Назва параметра	Одиниці вимірювання	Значення	
		Зима	Літо
<i>Параметри середовища</i>			
Тип середовища	-	природний газ	
Густина газу за стандартних умов	кг/м ³	0,722	
Абсолютний тиск	кПа	275	
Температура	°С	+5	+15
Витрата, приведена до стандартних умов	м ³ /Год	264,00	264,00
<i>Параметри навколишнього повітря</i>			
Температура навколишнього повітря	°С	-5	+25
Швидкість руху повітря	м/с	0	
<i>Параметри лічильника газу</i>			
Тип		GMS-G160-80-1.6-U2	
Конструктивні розміри (ДхШхВ)	мм	180x365x245	
<i>Параметри трубопроводу</i>			
Внутрішній діаметр трубопроводу	мм	65	
Зовнішній діаметр трубопроводу	мм	79	

Таблиця 3.17

Результати розрахунку

Назва параметру	Умовне позначення	Значення	
		Зима	Літо
Лінійний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м·К)	K_l	1,3282	1,3481
Зміна температури газу після протікання через роторний лічильник, °С	$\Delta T_{лг}$	-1,1242	1,1671
Температура газу на вході лічильника, °С	T_1	6,1242	13,8329

В системах обліку природного газу (середнього тиску, 275 кПа) на базі лічильника газу при похибці вимірювання температури газу $\Delta T = +1$ °С виникає методична похибка вимірювання об'єму газу $\delta_v = -0,3671$ %. Розрахунок похибки

вимірювання об'єму газу (δ_V) для різних значень похибки вимірювання температури газу (ΔT) у системах обліку на базі лічильника газу представлений у табл. 3.18.

Таблиця 3.18

Похибка вимірювання об'єму газу (δ_V) для різних значень похибки вимірювання температури газу (ΔT) у системах обліку на базі лічильника газу

$\Delta T, ^\circ\text{C}$	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
$\delta_V, \%$	+1,1010	+0,7341	+0,3671	0	-0,3671	-0,7343	-1,1015

Таким чином, виконавши експериментальне дослідження похибок ΔT_T та ΔT_x і порівнявши отримані експериментальні значення похибок із розрахунковими значеннями, встановлено, що розроблені моделі дають достатньо точні результати розрахунку і можуть бути застосовані на практиці 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.

Виконано дослідження теплообміну між потоком природного газу та корпусом роторного лічильника. Оскільки для приведення виміряного об'єму газу до стандартних умов необхідно мати значення температури газу в тому перерізі трубопроводу, де вимірюється тиск газу, тобто на вході лічильника, то при встановленні термоперетворювача на виході роторного лічильника виникає систематична похибка вимірювання температури газу ($\Delta T_{ЛГ}$), що приводить до відповідної похибки вимірювання об'єму газу. На основі експериментальних досліджень розроблено математичну модель похибки $\Delta T_{ЛГ}$, в основі якої лежить кореляційна залежність між лінійним коефіцієнтом теплопередачі (від потоку газу до навколишнього повітря) та еквівалентною довжиною прямолінійної ділянки трубопроводу.

Визначення та усунення перелічених похибок є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

Висновки до розділу 3

Виконано експериментальне дослідження теплового об'єкта (електрична піч), зареєстровано перехідні процеси каналом регулювання та каналом збурення. На основі отриманих експериментальних даних побудовано математичну модель об'єкта регулювання, адекватність якої підтверджено шляхом порівняння теоретичних кривих розгону з експериментальними. Розроблена модель була реалізована у програмованому логічному контролері. Ця модель може бути застосована для розрахунку параметрів автоматичного регулятора, а також для подальшого дослідження перехідних процесів у замкнутій системі автоматичного регулювання.

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.

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.

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 і може бути застосована на

практиці для дослідження цього об'єкта, а також для розроблення алгоритмів керування процесом розмелювання вугілля на ТЕС за допомогою КБМ.

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 ($T_{газ} < T_{нов}$), 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.

Виконано експериментальні дослідження похибок вимірювання температури потоку газу в системах його обліку, а саме: похибки, зумовленої теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу, похибки, зумовленої теплообміном між стінкою трубопроводу та навколишнім повітрям, та похибки, зумовленої 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 тому 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.

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.

Оскільки перелічені похибки мають систематичний характер, то їх визначення та усунення є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

РОЗДІЛ 4

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ АВТОМАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ ДЛЯ КЕРУВАННЯ НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ В ТЕПЛОВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ

Вибір закону регулювання та його параметрів налаштування залежить від характеру технологічного процесу, його статичних та динамічних властивостей. Відомо, що для простих одно-ємнісних об'єктів застосовують позиційний закон регулювання, тоді як для складних об'єктів – ПД-закон.

ПД-регулятор був створений у 1910 році [228]. Через 32 роки, в 1942 році, Зіглер і Нікольс розробили методику їх налаштування [229]. Після появи мікропроцесорів розвиток ПД-регуляторів проходив наростаючим темпом. Так, загальна кількість публікацій про ПД-регулятори з 1973 до 1982 року складала – 14 шт., за 10 років до 1992 р. – 111 шт., а до 2002 року – 225 шт. [230]. Сьогодні в наукометричній базі даних Scopus налічується понад 30 тис. публікацій за темою ПД-регуляторів.

ПД-регулятор відноситься до найбільш поширених типів регуляторів. Близько 90-95% регуляторів, які сьогодні є в експлуатації, застосовують ПД-алгоритм [231]. До причин такого широкого застосування цих регуляторів відносяться:

- простота побудови та промислового застосування;
- зрозумілість функціонування;
- придатність для вирішення більшості практичних задач і низька вартість.

Серед ПД-регуляторів 64% складають одноконтурні регулятори і 36% – багатоконтурні. Контролери зі зворотним зв'язком складають 85% всіх впроваджень, контролери з прямим зв'язком – 6%, а контролери, з'єднані каскадно – 9% [232].

У цьому розділі поставлено за мету виконати розрахунок параметрів налаштування ПД-регулятора для керування тепловим об'єктом, а також розробити алгоритм управління кульовим барабанним млином для оптимізації його завантаження.

4.1. Розрахунок параметрів налаштування регулятора для керування тепловим об'єктом

Є різні методи розрахунку параметрів налаштування ПД-регулятора. Для простих промислових об'єктів найбільшого поширення набув інженерний метод (метод CHR – Chien, Hrones, Reswick) та метод розширених частотних характеристик. На практиці часто застосовують метод Зіглера-Нікольса, згідно якого підбирають таке значення пропорційної складової, при якій у САР виникає автоколивний процес. Далі зменшують пропорційну складову у певну кількість разів і поступово вводять інтегральну складову. Після цього, за потреби вводять диференціальну складову. Ця методика базується на виконанні певної послідовності кроків і її, як правило, застосовують досвідчені інженери-наладчики.

Сьогодні досить часто застосовують алгоритм автоматичного налаштування параметрів ПД-регулятора (PID autotune) [231],[233],[234]. Суть цього алгоритму полягає у застосуванні дво-позиційного закону на першому кроці, щоб вивести об'єкт на автоколивний процес. А далі, на другому кроці, виконується розрахунок параметрів ПД-регулятора за показниками автоколивного перехідного процесу. Алгоритм автоналаштування реалізований у відповідних блоках програмного забезпечення для більшості промислових програмованих логічних контролерів.

Для застосування більшості методів розрахунку параметрів налаштування ПД-регулятора необхідна наявність математичної моделі об'єкта регулювання. Моделювання перехідних процесів у САР дозволяє визначити параметри автоматичного регулятора, які на практиці забезпечують стійкість системи та задовільну якість перехідних процесів.

У цьому підрозділі наведено результати розрахунку параметрів налаштування ПД-регулятора для теплового об'єкта із застосуванням інженерного методу та методу розширених частотних характеристик на базі розробленої моделі об'єкта регулювання (див. 3.1). Виконано аналіз якісних показників перехідних процесів, а саме час регулювання та максимальне динамічне відхилення. Вибрано числові значення параметрів налаштування, що забезпечують найкращу якість перехідних процесів.

4.1.1. Інженерний метод визначення параметрів ПД-регулятора

Суть інженерного методу (CHR методу) полягає у визначенні параметрів ПД-регулятора на основі кривої розгону об'єкта регулювання. Якщо отримано криву розгону об'єкта регулювання, то параметри автоматичного ПД-регулятора можуть бути встановлені згідно рекомендацій, наведених у [118], [235]. Крива розгону може бути знята у “ручному режимі” регулювання шляхом стрибкоподібної зміни керуючої дії. При цьому отримують криву, яка приблизно відповідає зображеній на рис. 4.1.

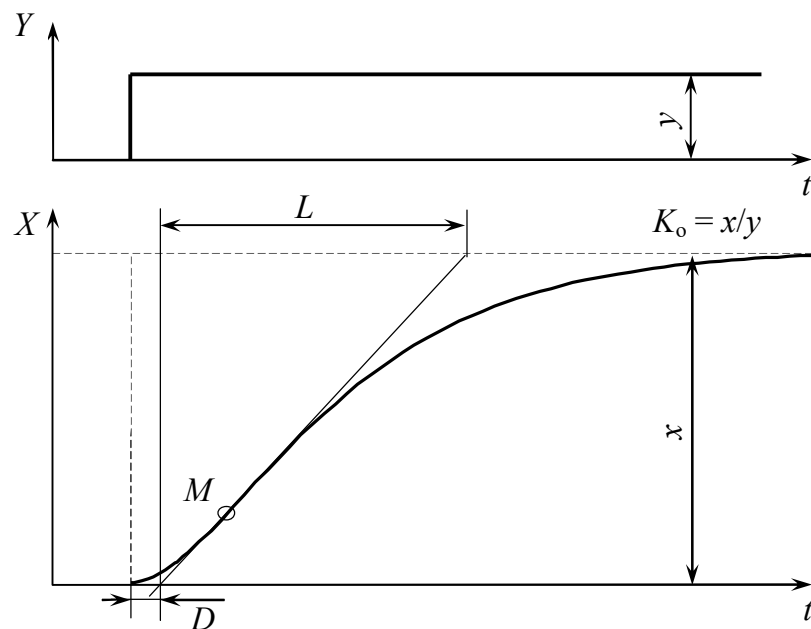


Рис.4.1. Перехідна функція об'єкта регулювання зі самовирівнюванням.

На рис.4.1 зроблено такі позначення: x – вихідна величина об'єкта регулювання; y – вхідна величина об'єкта регулювання; K_o – коефіцієнт передачі об'єкта регулювання; M – точка перегину; L – стала часу об'єкта регулювання; D – час запізнення.

На основі визначених L , D та K_o середні значення параметрів налаштування регулятора розраховують за такими емпіричними формулами:

П-регулятор:

Коефіцієнт пропорційності $K_P \approx L/(D \cdot K_o)$

ПІ-регулятор:

Коефіцієнт пропорційності $K_P \approx 0,8 \cdot (L/(D \cdot K_o))$

Стала часу ізодрому $T_{I3} \approx 3 \cdot D$

ПІД-регулятор:

Коефіцієнт пропорційності $K_P \approx 1,2 \cdot (L/(D \cdot K_o))$

Стала часу ізодрому $T_{I3} \approx D$

Стала часу диференціювання $T_D \approx 0,4 \cdot D$

Крива розгону теплового об'єкта була побудована із застосуванням його математичної моделі для каналу регулювання (див. підрозділ 3.1.2, рівняння (3.4)). Результати визначення параметрів налаштування автоматичного регулятора представлені у табл.4.1.

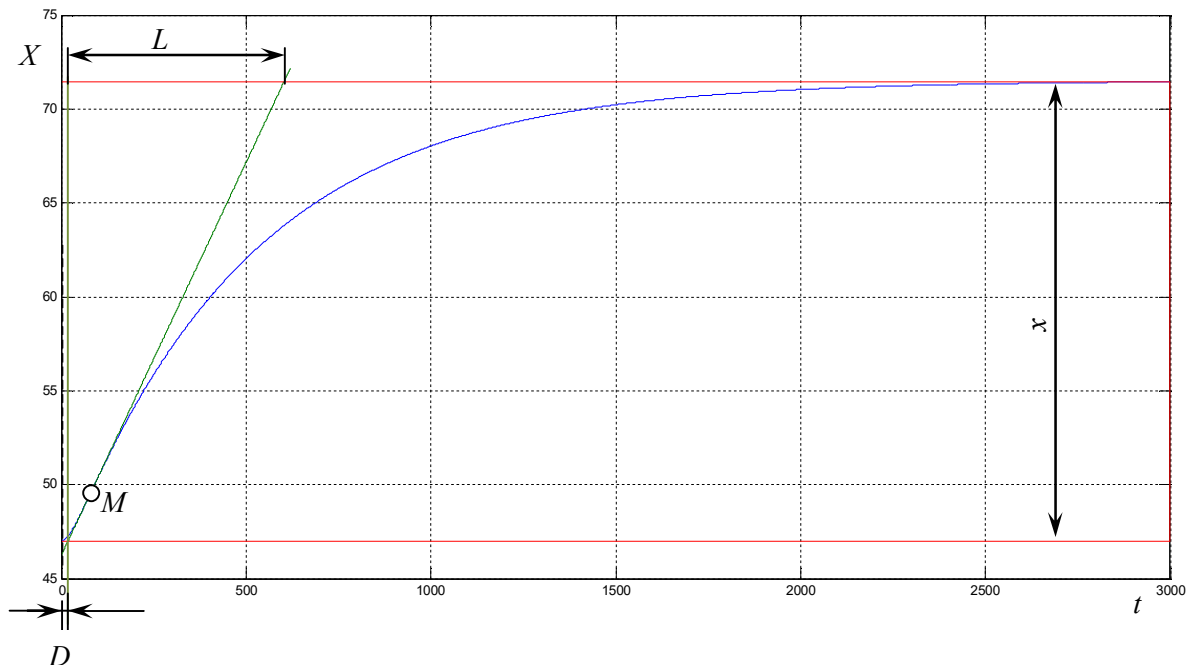


Рис.4.2. Крива розгону досліджуваного об'єкта регулювання (електрична піч).

Для аналізу результатів отриманих параметрів налаштування автоматичного регулятора було виконано моделювання перехідних процесів САР з

використанням аналогового автоматичного регулятора з налаштуваннями, які були отримані інженерним методом.

Перехідні процеси отримано шляхом зміни завдання регулятора (вихід на номінальний режим, до значення 70 °С), а також шляхом нанесення стрибкоподібного збурення шляхом зміни положення заслінки на виході вентилятора ($\Delta\mu_z = 50\%$).

Таблиця 4.1

Результати визначення параметрів налаштування автоматичного регулятора (інженерний метод)

Закон регулювання	$K_P, \%/^{\circ}\text{C}$	$T_{I3}, \text{с}$	$T_D, \text{с}$
П	57,73	–	–
ПІ	46,18	55,73	–
ПІД	69,27	18,58	7,43

Отже, було отримано перехідні процеси з використанням П-регулятора, ПІ-регулятора та ПІД-регулятора (див. рис.4.3-4.5). Для аналізу якісних показників перехідних процесів у САР на основі визначених параметрів налаштування автоматичного регулятора їх значення зведено у таблицю 4.2.

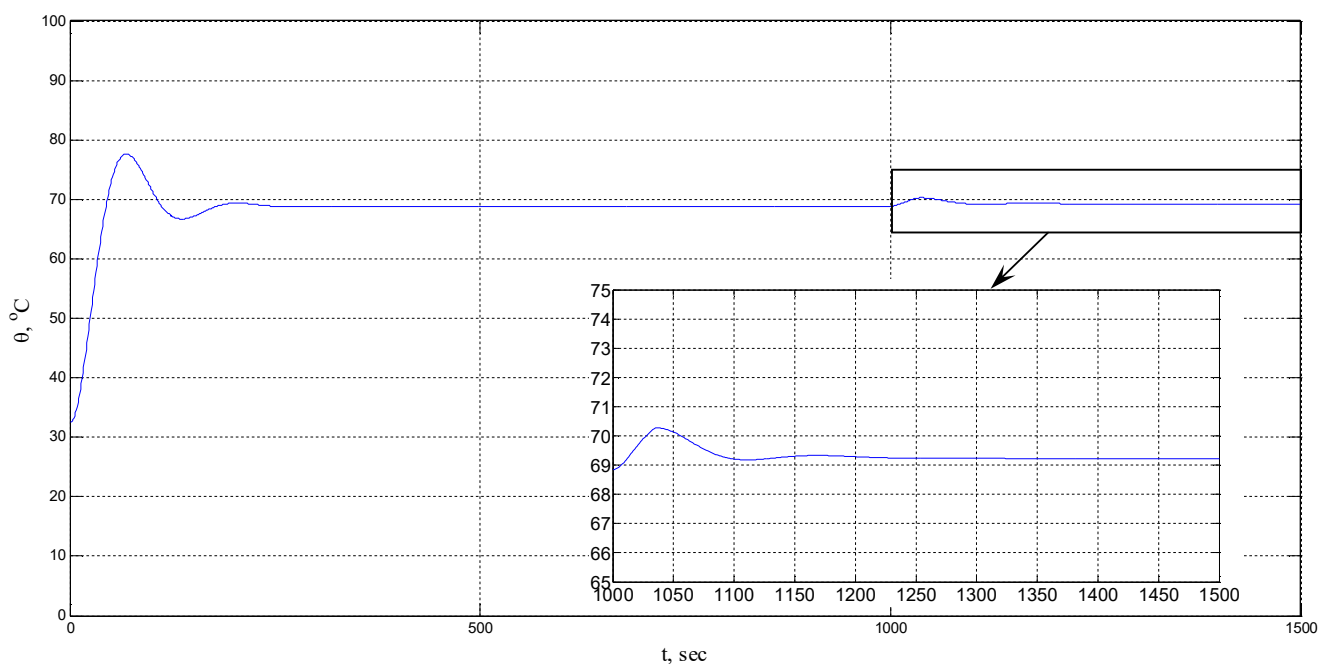


Рис. 4.3. Графік перехідного процесу в САР з П-регулятором.

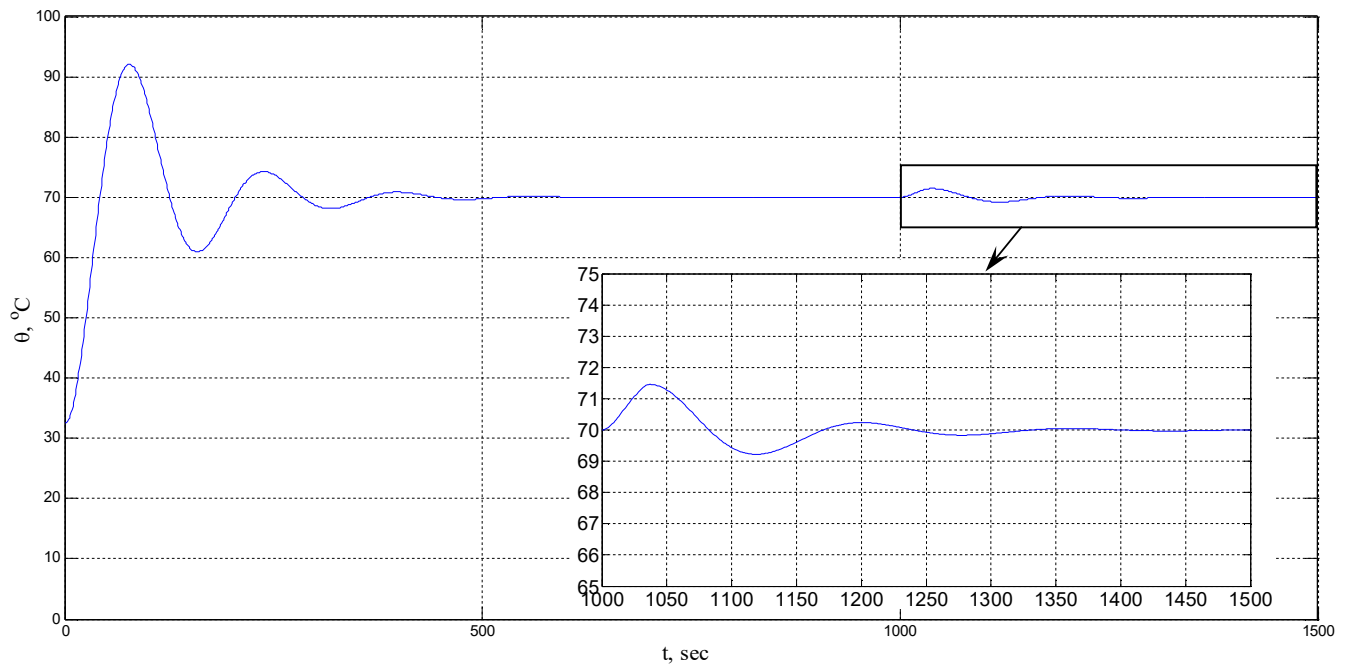


Рис. 4.4. Графік перехідного процесу в САР з ПІ-регулятором.

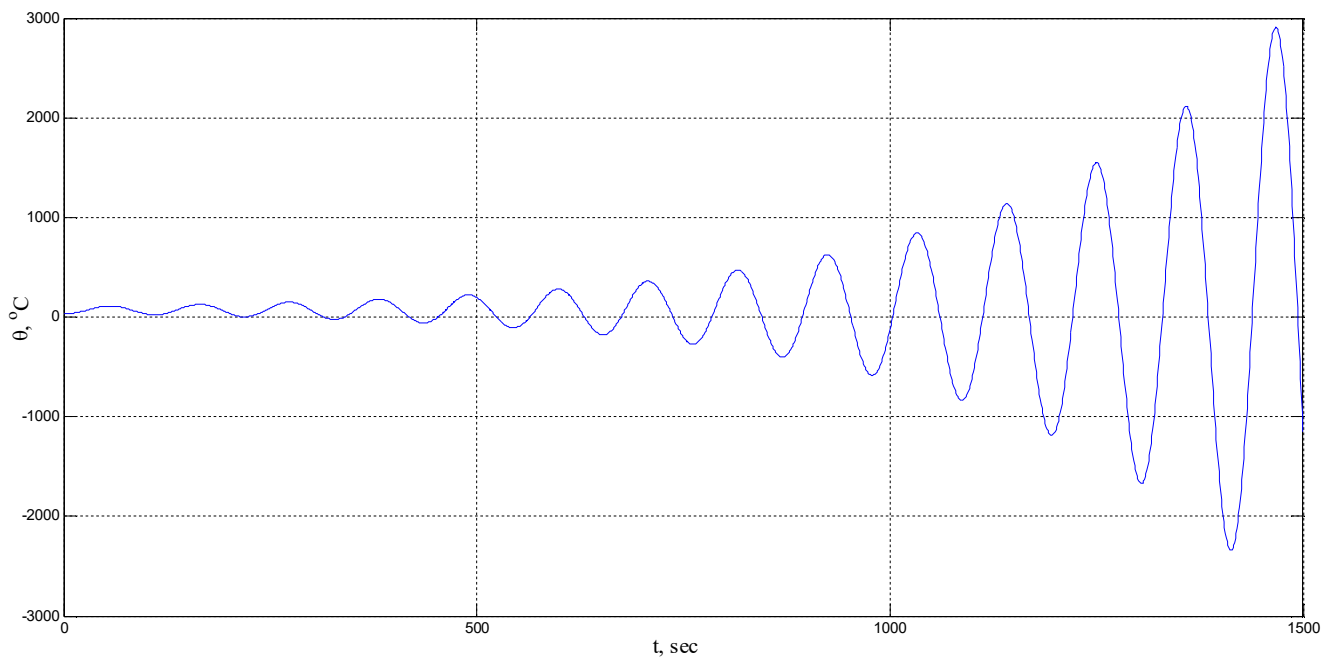


Рис. 4.5. Графік перехідного процесу в САР з ПІД-регулятором.

З графіка перехідного процесу САР з використанням П-регулятора (рис.4.3) видно, що автоматичний регулятор забезпечує високу швидкодію, проте у цьому перехідному процесі присутня статична похибка регулювання Δ_{cm} .

ІІІ-регулятор у складі САР (рис.4.4) забезпечує не таку високу швидкодiю, як ІІ-регулятор, проте, у перехiдному процесi вiдсутня статична похибка регулювання. Разом з цим, коливальнiсть перехiдного процесу зростає.

Як видно з графика перехiдного процесу САР з використанням ІІД-регулятора (рис.4.5) з отриманими параметрами налаштування система є нестійкою, тому використання ІІД-регулятора з налаштуваннями отриманими iнженерним методом у даній САР є неможливим.

Таблиця 4.2

Якісні показники перехiдних процесiв у САР для рiзних законiв регулювання (iнженерний метод)

Збурення змiною завдання регулятора (вихiд на номiнальний режим)					
Закон регулювання	$A_1, ^\circ\text{C}$	t_p, c	ψ	$\varphi, \%$	$\Delta_{ст}, ^\circ\text{C}$
ІІ	8,82	210	0,94	24	1,15
ІІІ	22,05	424	0,81	41	0
ІІД	41,2	-	-0,39	1,18	-
Збурення каналом збурення (витрата повітря через пiч)					
Закон регулювання	$A_1, ^\circ\text{C}$	t_p, c	ψ	$\varphi, \%$	$\Delta_{ст}, ^\circ\text{C}$
ІІ	1,07	68	0,94	24	0,79
ІІІ	1,46	145	0,93	53	0

З табл.4.2 видно, що найкращі результати забезпечує автоматичний регулятор із ІІІ законом регулювання, оскільки у САР з ІІ-регулятором присутня надто велика статична похибка, а САР з використанням ІІД-регулятора є нестійкою.

Для отриманих значень параметрiв налаштування автоматичного регулятора виконано моделювання перехiдних процесiв у системi автоматичного регулювання на базi рiзних схем регуляторiв. Результати моделювання наведенi у пiдроздiлі 5.1.

4.1.2. Розрахунок параметрів ПІД-регулятора методом розширених частотних характеристик

Виконано розрахунок параметрів автоматичного ПІД-регулятора методом розширених частотних характеристик (РЧХ), що базується на амплітудно-фазовому критерії стійкості (критерій Найквіста), який можна інтерпретувати як критерій запасу стійкості, якщо замість звичайних частотних характеристик застосовуються розширені частотні характеристики [236]-[239].

Розрахунок параметрів налаштування регулятора здійснено у два кроки. На першому кроці розраховано ПІ-регулятор, а на другому – ПІД. При розрахунку параметрів ПІ-регулятора було задано ступінь коливальності ($m = 0,62$), який для систем другого порядку відповідає значенню коефіцієнта зникання $\psi = 0,98$. Границя області заданого запасу стійкості САР представлена на рис.4.6.

Із побудованої границі області заданого запасу стійкості були вибрані оптимальні значення параметрів настроювання регулятора. Під оптимальними розуміють такі значення параметрів настроювання, які при заданому запасі стійкості САР забезпечують мінімальне значення критерію оптимальності. Цим критерієм у нашому випадку є друга інтегральна оцінка яка розраховується за формулою:

$$J_2 = \int_0^t [y(t) - y_{зад}(t)]^2 dt, \quad (4.1)$$

де $y(t)$ – крива розгону замкнутої САР при збуренні каналом збурення ($\Delta\mu_Z=50\%$); $y_{зад}$ – задане значення регульованої величини.

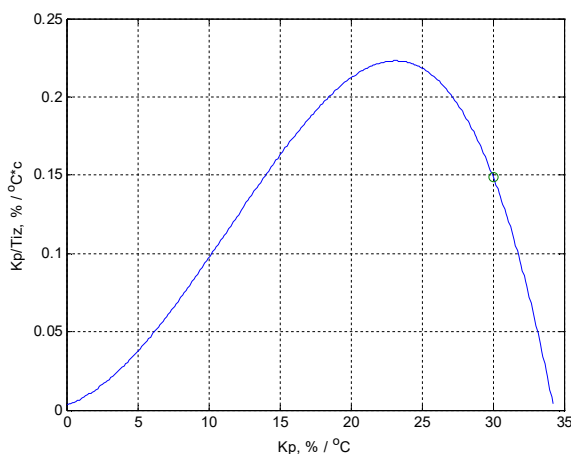


Рис. 4.6. Границя області заданого запасу стійкості САР та точка оптимальних значень налаштування ПІ-регулятора

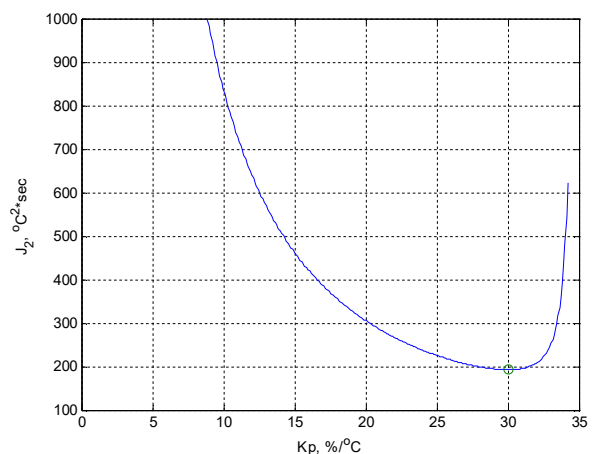


Рис. 4.7. Залежність критерію оптимальності від коефіцієнта пропорційності.

Отримані оптимальні значення параметрів налаштування ПІ-регулятора для вибраного об'єкта (електрична піч): $K_{PI_opt} = 30,03 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$, $T_{I3_opt} = 201,98 \text{ с}$. Пошук мінімуму другої інтегральної оцінки (рис.4.7) виконано методом Фібоначчі [240]-[243].

Для аналізу отриманих оптимальних параметрів налаштування ПІ-регулятора виконано моделювання перехідних процесів САР з використанням аналогового автоматичного регулятора з отриманими параметрами налаштування методом розширених частотних характеристик.

Моделювання перехідного процесу виконано шляхом зміни завдання регулятора (вихід на номінальний режим), а також шляхом нанесення стрибкоподібного збурення шляхом зміни положення заслінки на виході вентилятора ($\Delta\mu_z = 50 \%$).

Показники якості перехідних процесів у САР з використанням ПІ-регулятора із налаштуваннями, визначеними спрощеним методом та методом розширених частотних характеристик, зведені у табл.4.3, а порівняння перехідних процесів представлено на рис.4.8.

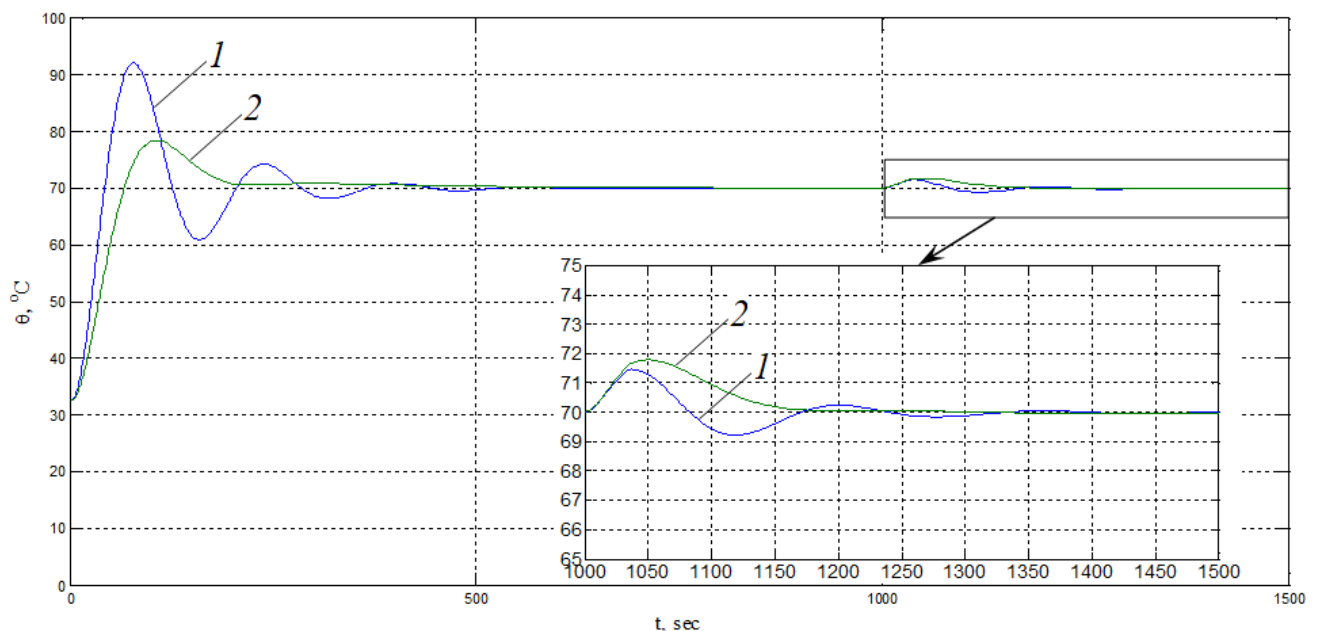


Рис. 4.8. Графік порівняння перехідних процесів у САР з ПІ-регулятором

(1 – налаштування отримані інженерним методом;

2 – налаштування отримані методом РЧХ).

Таблиця 4.3

Якісні показники перехідних процесів у САР на базі ПІ-регулятора

Метод визнач. парам. АР	K_{II} , %/°C	T_{I3} , с	A_1 , °C	t_p , с	ψ	ϕ , %	Δ_{cm} , °C
Збурення зміною завдання регулятора (вихід на номінальний режим)							
Інженерний	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)							
Інженерний	46,18	55,73	1,46	145	0,93	53	0
РЧХ	30,03	201,98	1,78	123	1	0	0

З табл.4.3 видно, що параметри налаштування автоматичного регулятора, отримані методом РЧХ, забезпечують кращу якість перехідних процесів, оскільки час регулювання є меншим, а ступінь заникання є більшим.

Отже, отримані значення параметрів налаштування ПІ-регулятора ($K_{II} = 30,03$ %/°C, $T_{I3} = 201,98$ с) забезпечують найкращу якість регулювання, тому вони будуть використані для подальшого дослідження перехідних процесів у замкнутій САР із застосуванням розробленої моделі вибраного об'єкта регулювання.

Для розрахунку параметрів ПІД-регулятора методом РЧХ модель об'єкта регулювання скоректовано наступним чином:

- функція передачі ОР каналом регулювання описується виразом (3.4) з такими числовими значеннями параметрів: $k_x=0,5446$ °C/%; $a_x=49,96$ с; $b_x=25,22$ с.

- функція передачі ОР каналом збурення описується аналогічним виразом (3.4) з такими числовими значеннями параметрів: $k_z=-0,2320$ °C/%; $a_z=29,43$ с; $b_z=6,57$ с.

Для скоректованої моделі об'єкта регулювання виконано розрахунок параметрів налаштування ПІ- та ПІД-регулятора (згідно [236]), а також змодельовано перехідні процеси та визначено показники якості для них. Результати розрахунків та моделювання представлені на рис.4.9 та у табл.4.4. Числові значення параметрів налаштування автоматичного регулятора відповідають схемі аналогового ПІД-регулятора зі змішаною структурою (у функції передачі якого K_{II} винесене за дужки).

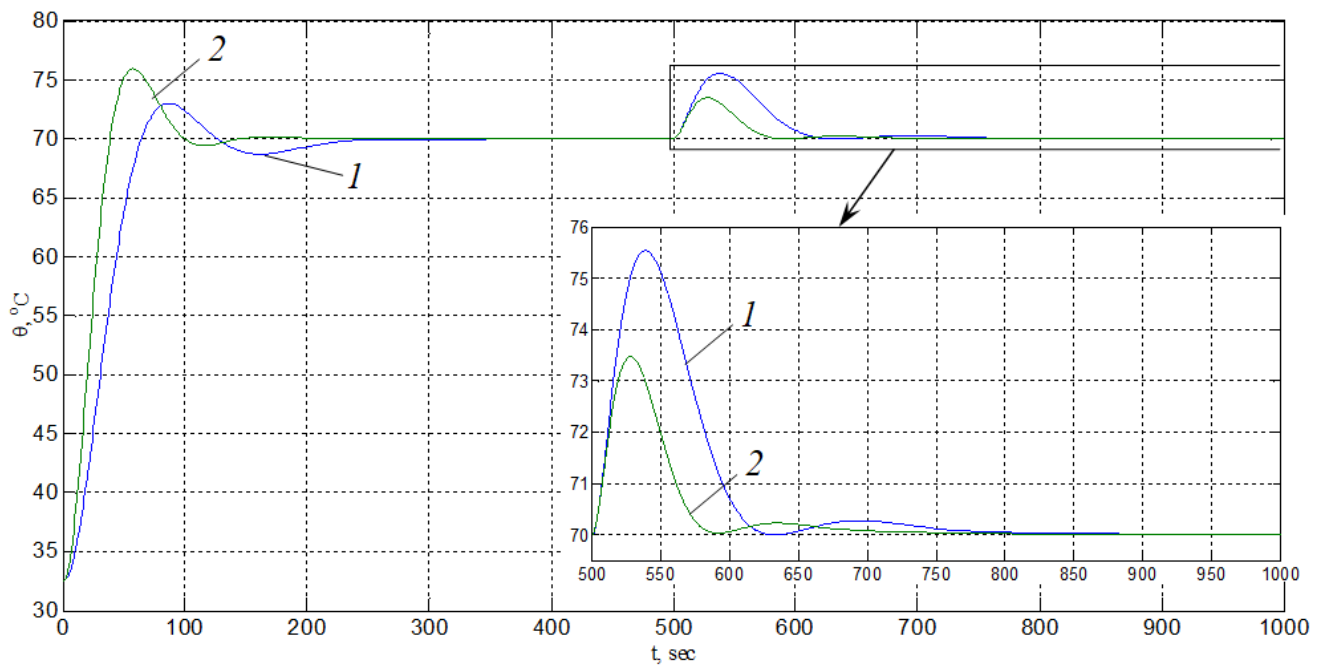


Рис. 4.9. Графік порівняння перехідних процесів у САР з ПІ-регулятором (1) та ПІД-регулятором (2) для скоректованої моделі об'єкта регулювання.

Таблиця 4.4

Якісні показники перехідних процесів у САР на базі ПІ- та ПІД-регулятора

Закон регулюв.	$K_{П}$, %/°C	$T_{ІЗ}$, с	$T_{Д}$, с	A_1 , °C	t_p , с	ψ	ϕ , %
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 отриманих результатів видно, що ПІД закон регулювання забезпечує кращу якість перехідних процесів, ніж ПІ закон, оскільки максимальне динамічне відхилення та час регулювання є меншими для збурення каналом збурення.

4.2. Розробка алгоритму управління роботою кульового барабанного млина для оптимізації його завантаження

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. На млині можуть виникати такі аварійні ситуації:

- завал млина;
- вибух аеросуміші;
- блокування та вихід з ладу пилепроводів.

Ще одною причиною аварії на КБМ може бути вихід з ладу контрольно-вимірювальних приладів.

Завал млина (замелювання млина) – це ситуація, коли у барабані млина знаходиться занадто велика кількість вугілля, яке обертається разом з кулями, і не відбувається процес розмелювання. Завал млина може відбутись в таких умовах:

- при подачі у млин занадто великої кількості сирого вугілля;
- при зміні властивостей сирого вугілля (вологість, гранулометричний склад);
- при раптовій зупинці подачі вугілля у млин за умови знаходження млина в режимі оптимального завантаження.

Під час налагодження системи автоматичного керування роботою КБМ, млин попередньо калібрують, тобто знімають статичну характеристику залежності завантаженості млина (L) від продуктивності ЖСВ ($F_{\text{вуг}}$). Завантаженість млина є також мірою розмелювальної продуктивності млина (F_p). Приклад такої характеристики показаний на рис.4.10. Як видно зі статичної характеристики КБМ, 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.

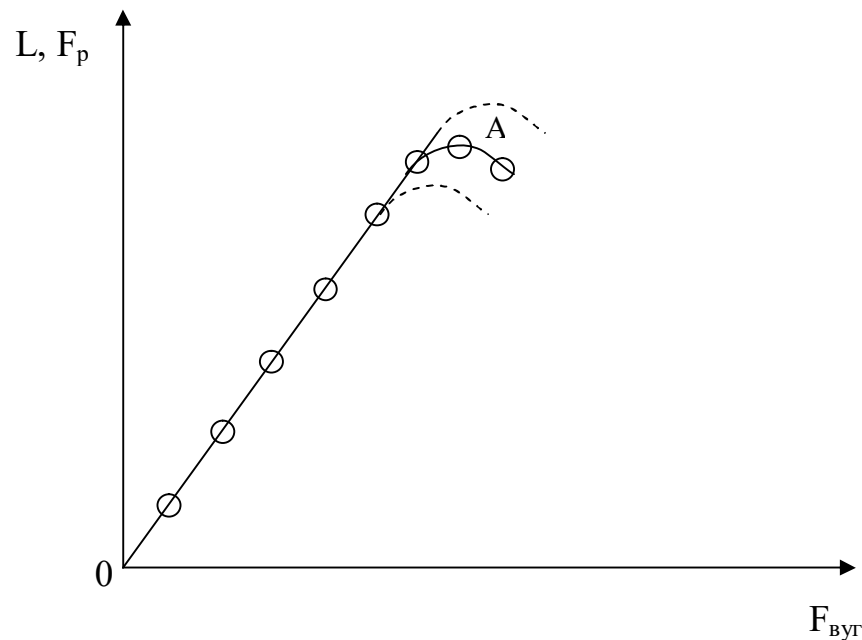


Рис.4.10. Статична характеристика КБМ (L – завантаженість млина (кількість матеріалу в млині), F_p – розмелювальна продуктивність млина, $F_{вуг}$ – витрата сирого вугілля, що поступає в КБМ, точка А – оптимальна завантаженість млина).

Після калібрування млина, керування його роботою здійснюється відповідно до отриманої статичної характеристики, а захист від завалу млина забезпечується шляхом вимірювання вібрації опор підшипників на вході та виході млина, а також перепаду тисків на млині.

Якщо рівні вібрації опор підшипників на вході та виході млина опускаються нижче допустимих значень (для кожного підшипника це допустиме значення є своє), повинен спрацювати захист для припинення подачі сирого вугілля у млин для запобігання завалу.

Захист від завалу здійснюється також за вимірним значенням перепаду тисків на барабані млина. Якщо перепад тиску перевищує допустиме значення, необхідно припинити подачу сирого вугілля у млин.

Під час запуску млина з вихолощеного стану, подачу вугілля здійснюють поступово, щоб не завалити млин. При імпульсній подачі сирого вугілля (коли продуктивність ЖСВ в 2-3 рази більша від розмелювальної продуктивності млина) поступово збільшують тривалість імпульсів, а при неперервній подачі – поступово збільшують продуктивність ЖСВ. Поступове наповнення млина вугіллям показане на рис.4.11.

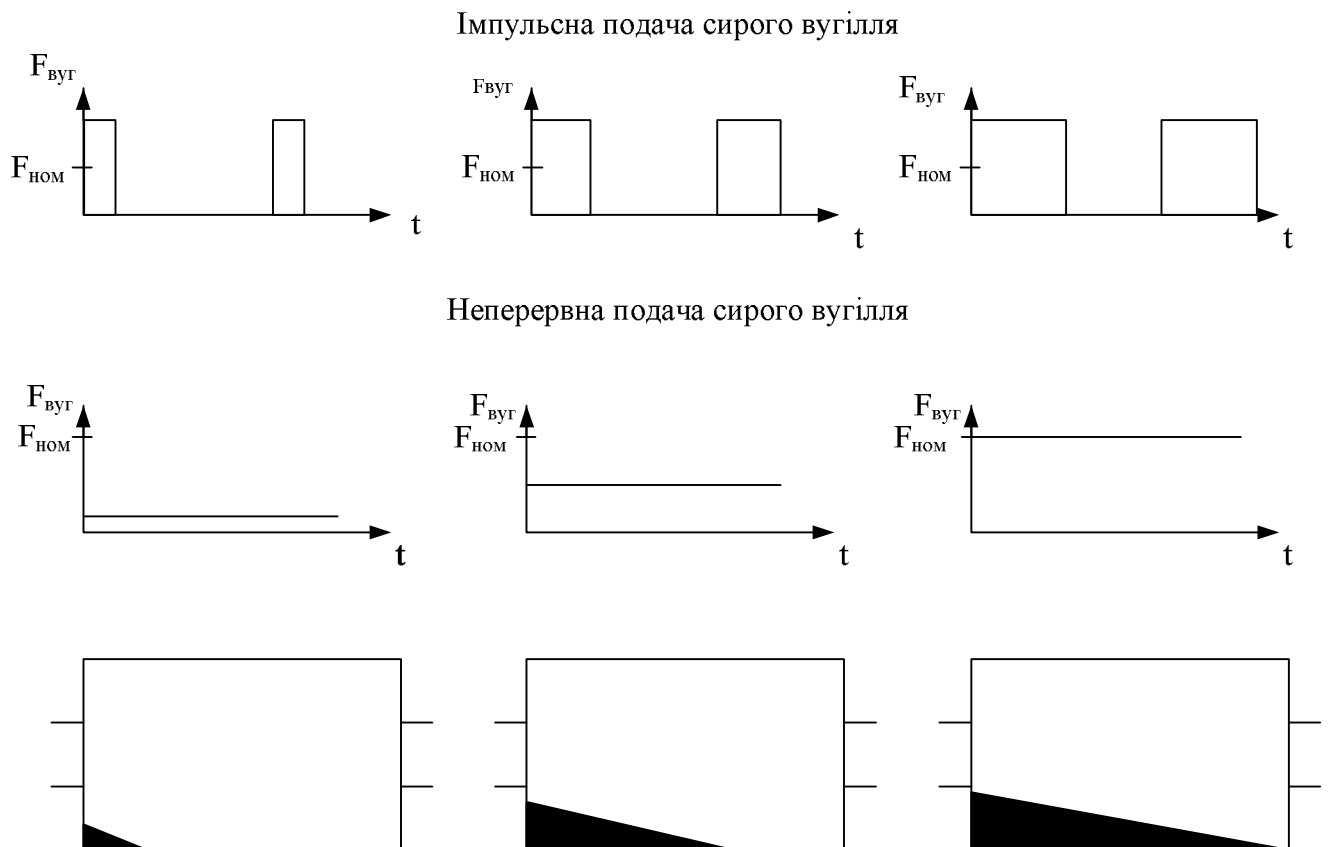


Рис.4.11. Поступове наповнення млина вугіллям.

Оптимальним вважається завантаженість млина, при якій розмелювальна продуктивність є максимальною (точка А на рис.4.10), при цьому розподіл вугілля по довжині млина приблизно такий, як це показано на рис.4.12.

Під час раптового припинення подачі сирого вугілля виникає ризик блокування та виходу з ладу пилепроводів. Це пов'язано із тим, що при різкому зниженні подачі сирого вугілля відбудеться рівномірний розподіл вугілля по

довжині млина, у результаті чого різко збільшиться кількість вугільного пилу грубої фракції у млині та в аеросуміші (див рис.4.13). Збільшення вмісту грубої фракції пилу приведе до зростання перепаду тисків на млині до певного максимального значення, після чого перепад тисків буде спадати. У випадку збільшення перепаду тиску до критично значення може відбутися блокування та вихід з ладу пилепроводів. Тому під час керування роботою КБМ необхідно дотримуватися режиму, при якому перепад тисків не досягає критичного значення, а зупинку млина здійснюють шляхом поступового зменшення тривалості імпульсів (при імпульсній подачі сирого вугілля), або шляхом поступового зменшення продуктивності ЖСВ (при неперервній подачі сирого вугілля).

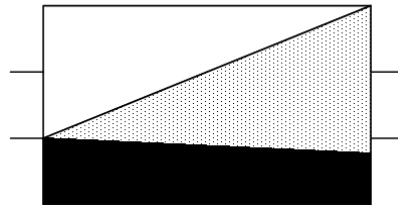


Рис.4.12. Розподіл вугілля при оптимальній завантаженості млина.

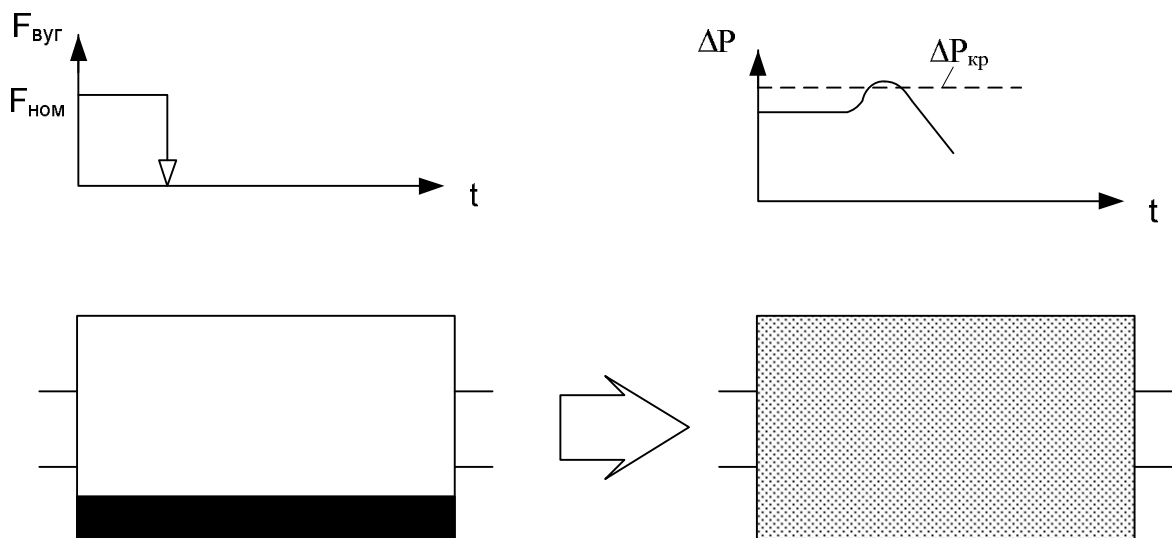


Рис.4.13. Зростання перепаду тисків внаслідок раптової зупинки подачі сирого вугілля.

Крім завалу та блокування пилепроводів на млині може виникнути й інша аварійна ситуація – вибух аеросуміші на виході млина. Цей вибух спричиняють горючі компоненти, що знаходяться у вугільному пилі, при перевищенні температури аеросуміші допустимої межі. Для запобігання вибуху, у схемі автоматичного керування слід передбачити захист при перевищенні допустимого значення температури аеросуміші на виході млина. Захист повинен діяти на температуру сушильного агента, а саме збільшити подачу повітря з навколишнього середовища. При цьому може виникнути інша небезпека, оскільки вміст кисню в сушильному агенті буде підвищений, то може зрости ризик вибуху. Тому співвідношення витрат навколишнього повітря і димових газів повинно знаходитися у чітко визначених межах.

У якості сушильного агента для КБМ застосовують суміш димових газів та навколишнього повітря. Для забезпечення достатньої сушильної продуктивності, температура сушильного агента повинна знаходитись в межах 300-500 °С залежно від типу млина та характеристик вугілля.

У схемі автоматичного керування роботою КБМ слід передбачити ще один захист для запобігання зниженню температури аеросуміші на виході млина нижче допустимого значення. Таке зниження температури може виникнути внаслідок поступлення у млин вугілля із підвищеною вологістю. Коли температура аеросуміші опускається нижче допустимого значення, повинен спрацювати захист для припинення подачі сирого вугілля у млин.

Певним обмеженням для підвищення розмелювальної продуктивності КБМ є стан пилепроводів. Якщо має місце негерметичність пилепроводів, то вентиляційна продуктивність млина знижується і загальна ефективність роботи КБМ зменшується. Ще одним обмеженням є замалий або завищений рівень кульового заряду у млині. Рівень кульового заряду КБМ залежить від типу млина та характеристик вугілля.

Система автоматичного керування роботою КБМ може стати причиною аварії у випадку виходу з ладу вимірювальних перетворювачів вібрації, температури та перепаду тиску. Тому важливим є надійність самих приладів, а також спосіб їх монтажу. Необхідно встановлювати надійні вимірювальні перетворювачі із дотриманням усіх вимог монтажу.

Функціональна схема автоматизації процесу розмелювання вугілля за допомогою КБМ показана на рис.4.14, де прийнято такі позначення БСВ – бункер сирого вугілля; ЖСВ – живильник сирого вугілля (стрічковий конвеєр); КБМ – кульовий барабанний млин; С – сепаратор; Ц – циклон (очищення повітря від пилу); БП – бункер пилу; МВ – млиновий вентилятор; ПЖ – пилеживильник.

Сире вугілля для подрібнення подається з бункера сирого вугілля (БСВ) на живильник сирого вугілля (ЖСВ), який переміщає його у кульовий барабанний млин (КБМ), що обертається. Також на вхід КБМ поступає сушильний агент (суміш димових газів та навколишнього повітря). Подрібнене вугілля разом з сушильним агентом утворюють аеросуміш, яка виходить з КБМ і поступає у сепаратор (С), де відділяються частинки за розмірами. Груба фракція розмелених частинок повертається у КБМ на повторне перемелювання (повернення зі сепаратора). Аеросуміш після сепаратора потрапляє у циклон (Ц), де відбувається розділення сушильного агента і вугільного пилу. Вугільний пил потрапляє у бункер пилу (БП), а звідти на пилеживильник (ПЖ).

У системі керування КБМ вимірюються такі сигнали:

- 1) температура аеросуміші на виході КБМ (для сигналізації, захисту та регулювання);
- 2) вібрація на вхідному підшипнику (для сигналізації та захисту);
- 3) вібрація на вихідному підшипнику (для сигналізації та захисту);
- 4) перепад тиску на млині (для сигналізації та захисту);
- 5) температура сушильного агента (для індикації).

Регулювання рівня завантаженості млина здійснюється за температурою аеросуміші на виході млина, шляхом зміни продуктивності (швидкості руху) живильника сирого вугілля ЖСВ.

Пилесистема із промбункером з погляду автоматичного регулювання є відособленим об'єктом, не пов'язаним з іншими процесами котлоагрегату. Тому завданням регулювання пилесистеми на відміну від інших агрегатів є підтримка максимальної продуктивності млина при заданій якості пилу (вологість і тонина помолу).

Кульові барабанні млини відрізняються більшою витратою електроенергії на холостий хід, тому з економічної точки зору також вигідніше тримати на млині

максимальну продуктивність, що забезпечить мінімальні питомі витрати електроенергії на тону готового пилу [26], [173].

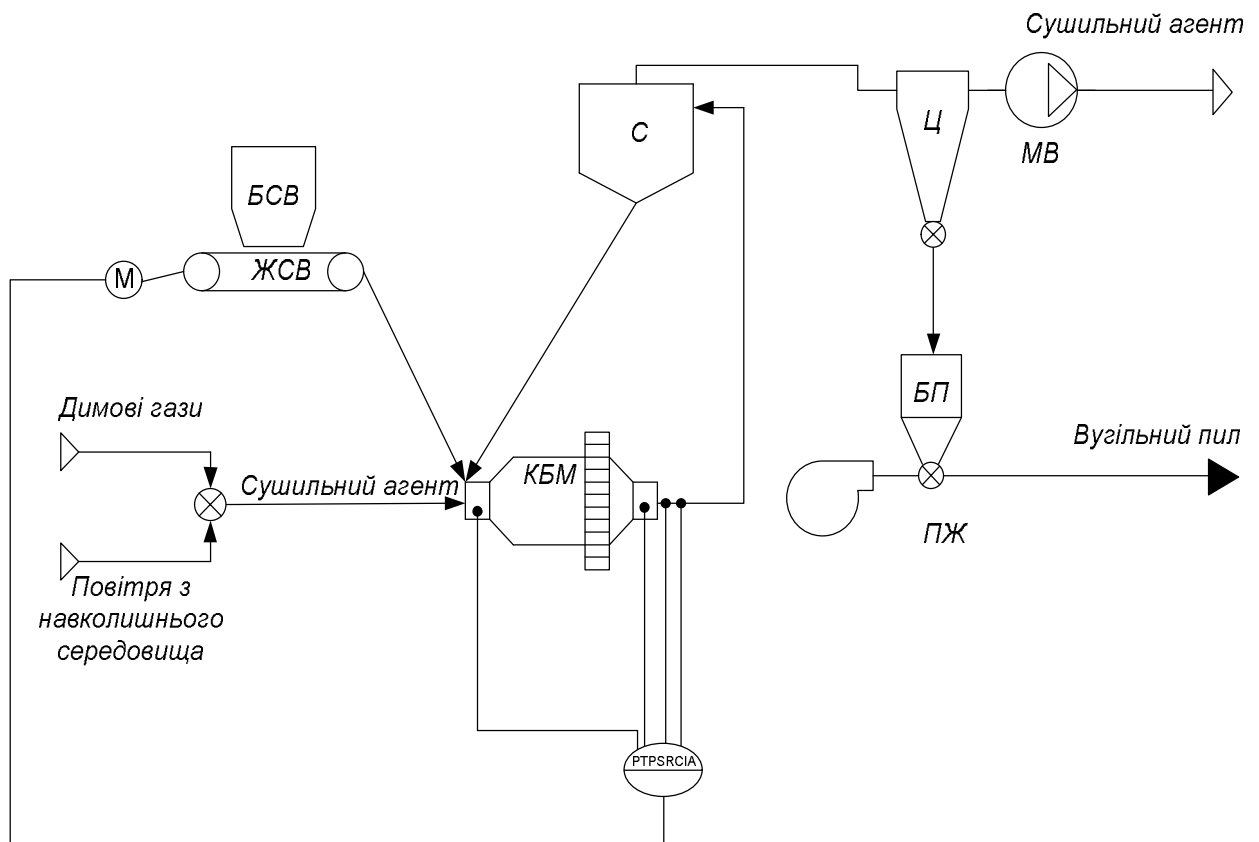


Рис.4.14. Функціональна схема автоматизації КБМ.

На сьогодні існують такі алгоритми керування роботою КБМ:

- імпульсна подача сирого вугілля з фіксованою тривалістю імпульсів та пауз між ними (див. рис.4.15);
- керування за вимірним сигналом вібрації опори переднього підшипника з імпульсною подачею сирого вугілля (див. рис.4.16);
- керування за вимірним сигналом перепаду тиску на млині з імпульсною подачею сирого вугілля (див. рис.4.17);
- керування за вимірним сигналом температури аеросуміші на виході млина з імпульсною подачею сирого вугілля (див. рис.4.18);
- керування за вимірним сигналом споживаної активної потужності приводу КБМ з імпульсною подачею сирого вугілля (див. рис.4.19).

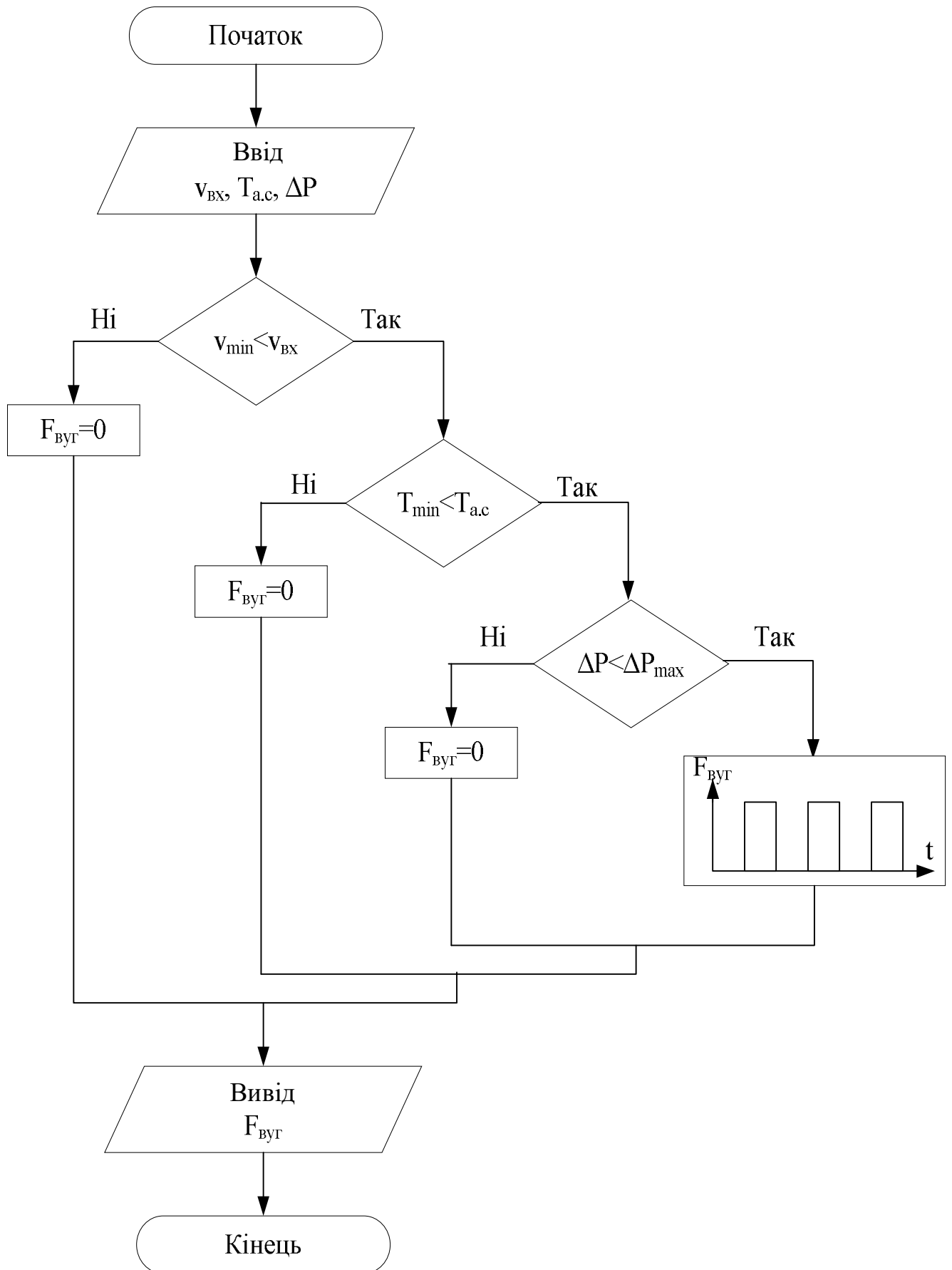


Рис.4.15. Блок-схема алгоритму імпульсної подачі сирого вугілля у КБМ з фіксованою тривалістю імпульсів та пауз між ними.

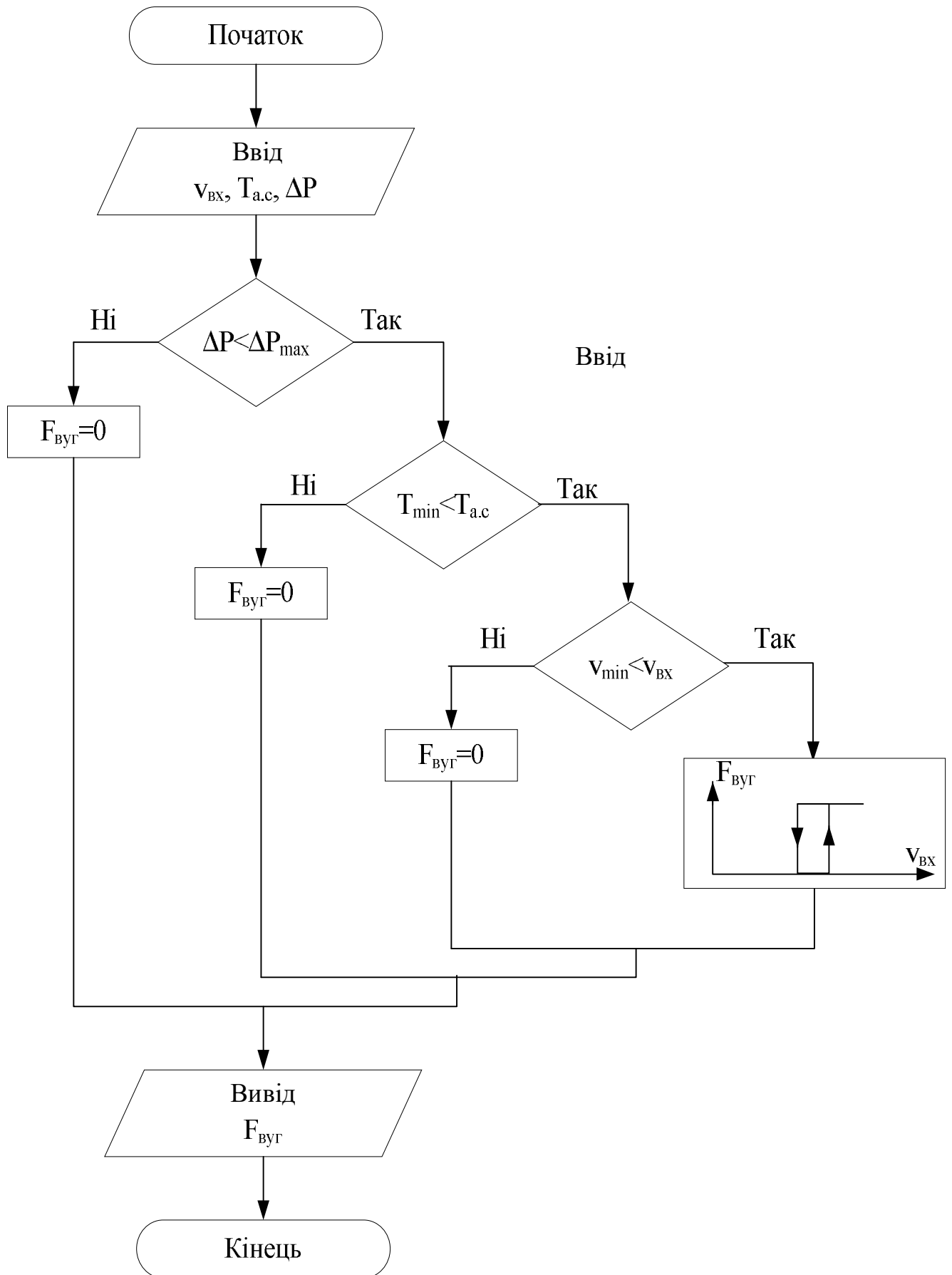


Рис.4.16. Блок-схема алгоритму керування роботою КБМ за вимірним сигналом вібрації опори переднього підшипника з імпульсною подачею сирого вугілля.

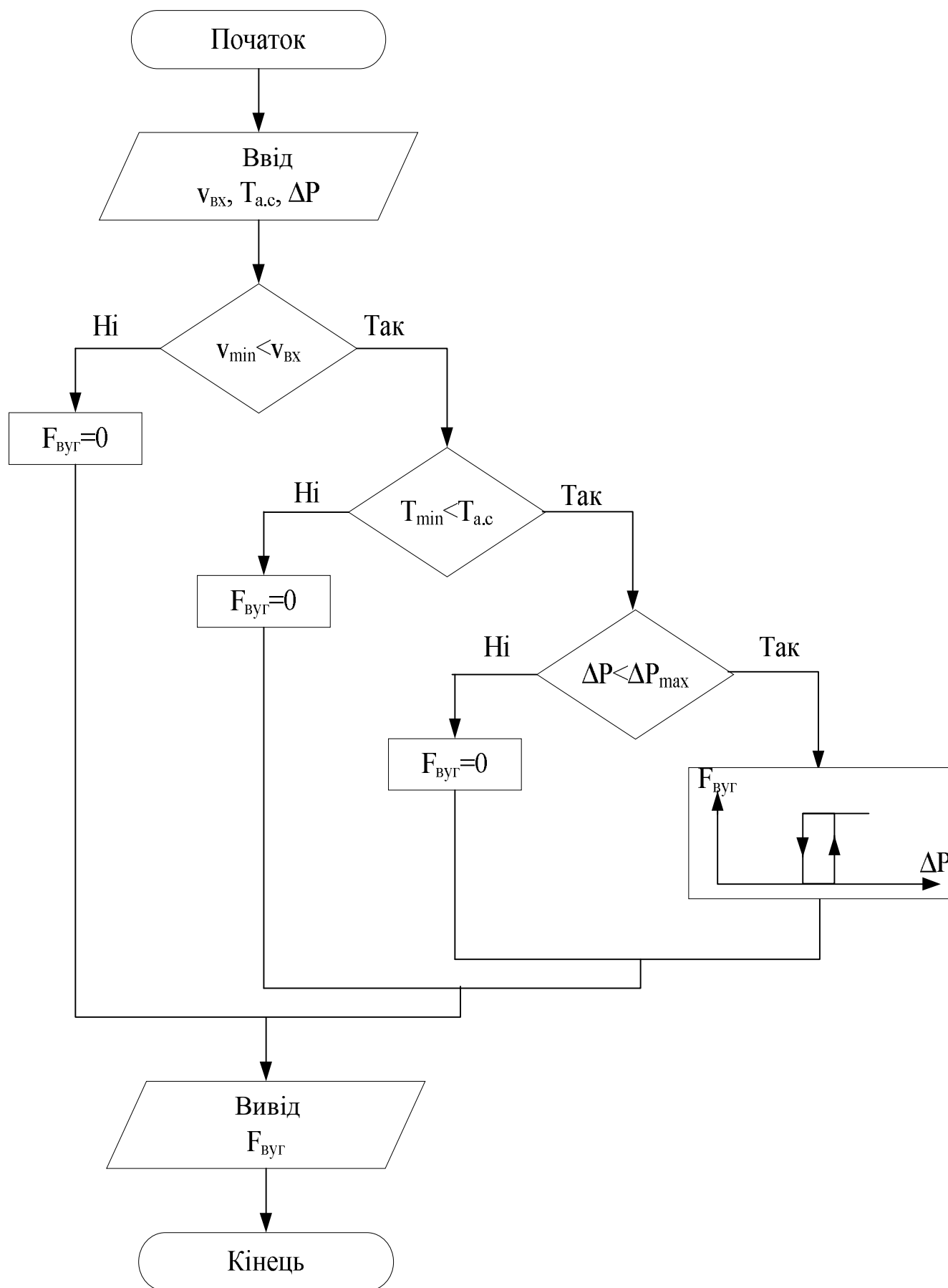


Рис.4.17. Блок-схема алгоритму керування роботою КБМ за вимірним сигналом перепаду тиску на млині з імпульсною подачею сирового вугілля.

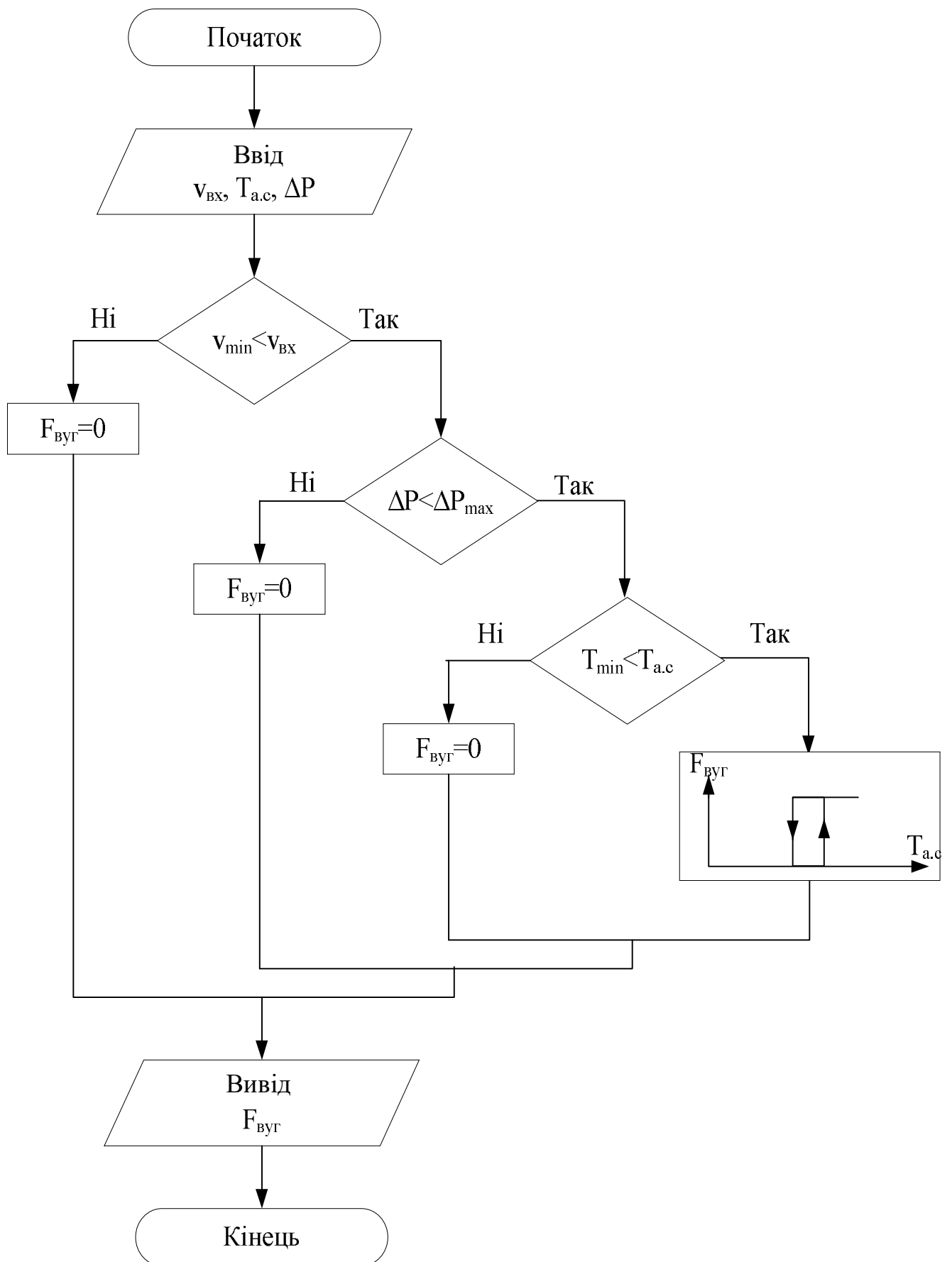


Рис.4.18. Блок-схема алгоритму керування роботою КБМ за вимірним сигналом температури аеросуміші на виході млина з імпульсною подачею сирого вугілля.

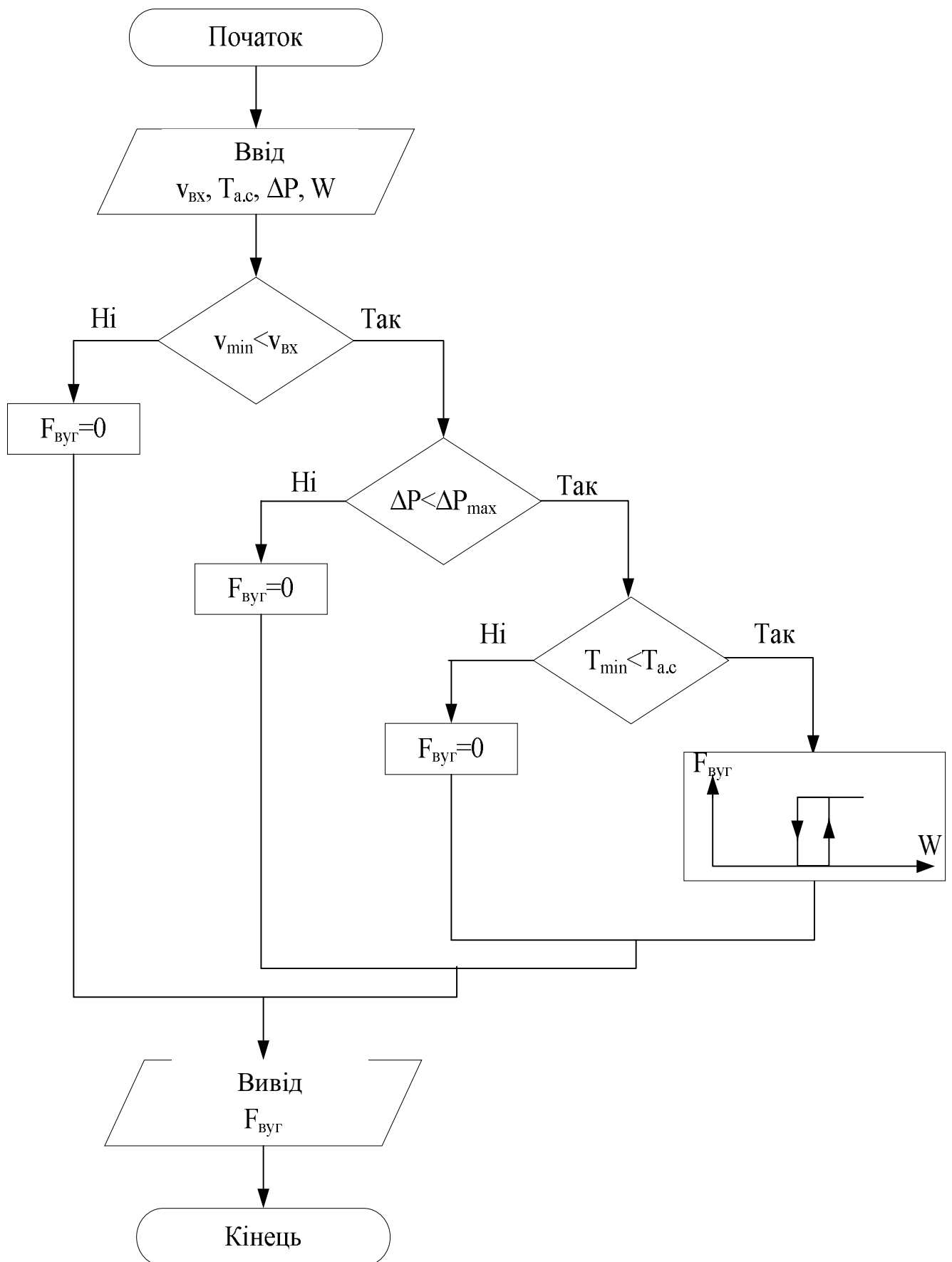


Рис.4.19. Блок-схема алгоритму керування роботою КБМ за вимірним сигналом споживаної активної потужності приводу млина з імпульсною подачею сирого вугілля.

Недоліками цих алгоритмів є те, що вони не забезпечують максимально можливу розмелювальну продуктивність млина при зміні характеристик сирого вугілля.

4.2.1. Обґрунтування необхідності розробки нового алгоритму керування завантаженням кульового барабанного млина

Для забезпечення високої якості процесу горіння в котлоагрегаті необхідно, щоб пил, отриманий із млина, мав постійну тонину помелу й вологість. Постійна тонина пилу може бути забезпечена тільки при заданих налаштуваннях сепаратора та при постійній швидкості пилеповітрянної суміші. Слід зазначити, що прагнення до підтримки постійної швидкості руху повітря через пилесистему є невірним, тому що при постійній швидкості повітря, але змінному завантаженню барабана млина паливом або зміні його характеристик (вологість, твердість й ін.) може мати місце різна швидкість пилеповітрянної суміші, а, отже, і різна тонина помелу.

Швидкість пилеповітрянної суміші варто вимірювати на ділянці млин-сепаратор, тому що тільки в цьому випадку ми одержимо імпульс, що дозволяє підтримувати сталість тонини помелу. Доступного промислового приладу або установки, що дозволяють автоматично здійснювати безперервні виміри вологості пилу, поки не існує. Однак з деяким наближенням вологість пилу характеризується температурою аеросуміші за млином. Підтримка сталості цієї температури дозволяє не тільки підтримувати постійну вологість готового пилу, але також створює умови для забезпечення постійної тонини помелу.

Слід зазначити, що для вугілля, що має малу вологість (антрацит), а також для вибухобезпечних типів вугілля, у яких вологість змінюється в незначних межах, підтримка постійної температури аеросуміші за млином не є обов'язковою.

Економічність роботи млина оцінюється по питомій витраті електроенергії (кіловат-година на тонну готового пилу). Вага палива, що розмелюється, у порівнянні із загальною вагою млина й завантажених куль досить незначна і становить приблизно 4-6%. Тому зміна кількості палива в млині, а, отже, і зміна її

продуктивності практично не впливають на потужність, споживану млином. Із цього погляду здавалося б, що для забезпечення економічної роботи млина необхідно підтримувати максимальне завантаження млинів паливом. Однак продуктивність млина при збільшенні її завантаження росте тільки до певної межі заповнення барабана паливом (межі насичення). Збільшення кількості палива в барабані понад межу насичення приводить до зниженні продуктивності млина. Таким чином, для забезпечення економічної роботи млина необхідно підтримувати не максимальне, а оптимальне завантаження, тобто найвигідніше (при даному стані й режимі роботи пилесистеми) заповнення барабана млина паливом. Це оптимальне завантаження барабана млина паливом встановлюється на підставі спеціальних випробувань пилесистеми. Продуктивність млина, що відповідає оптимальному завантаженню її паливом називається граничною [244], [245].

Відповідно до виконаних дослідів сутність найвигіднішого заповнення барабана млина паливом полягає в наступному. При зменшенні кількості палива нижче найвигіднішого заповнення частина куль не буде використовуватися для розмелювання палива. Енергія куль у цьому випадку піде на стирання куль і на зношування броні. У випадку ж підвищення кількості палива понад найвигідніше заповнення енергія куль буде також витрачатися не на розмелювання палива, а на деформацію шару палива між кулями. Виходячи із цієї фізичної сутності процесу розмелювання, можна констатувати, що встановлена на підставі спеціальних випробувань найвигідніша кількість палива, що перебуває в барабані, буде забезпечувати економічну роботу млина тільки при незмінній кількості й сортаменті куль. При зменшенні або збільшенні кількості куль, а також при зміні їхнього сортаменту величина найвигіднішого заповнення барабана млина паливом також зміниться.

Гранична продуктивність млина залежить не тільки від найвигіднішого заповнення барабана млина паливом, але й від ряду інших факторів (вентиляція, тонина помелу, вологість, розмелювальна здатність, крупність дроблення і т.д.). Наприклад, при незмінних інших факторах збільшення вентиляції приводить до зростання продуктивності млина, збільшення вологості палива (особливо при обмежених сушильних можливостях пилесистеми) – до зменшення продуктивності млина й т.п.

Отже, з огляду на реальні умови роботи пилесистем, неможливо ототожнювати максимальну продуктивність млина й оптимальне заповнення її барабану вугіллям. Тому здійснювати на всіх пилесистемах і при всіх режимах їхньої роботи регулювання завантаження по імпульсах, що характеризує продуктивність млина не рекомендується, оскільки при зміні перерахованих вище зовнішніх факторів таке регулювання може привести до перевантаження або розхолощування млина. На жаль в практиці автоматизації пилесистем, обладнаних КБМ із промбункером, твердо вкоренилася думка, що регулювання їхнього завантаження можна здійснювати за допомогою стандартних алгоритмів регулювання, що не враховують зміни реальних умов роботи млина. Це привело до того, що існуючі системи регулювання забезпечують граничне завантаження млина тільки впродовж короткого періоду часу, а при наявності зовнішніх збурень приводять до перевантаження, або розхолощування млина. Це змушує машиністів переходити на ручне керування. Тому перед нами стояла задача створити алгоритм регулювання, що здатний кожний раз оцінювати реальну розмелювальну здатність млина і враховувати стан пилесистеми в комплексі.

4.2.2. Алгоритм управління млином

Пропонується удосконалений алгоритм автоматичного керування роботою КБМ, відповідно до якого подача сирого вугілля у млин здійснюється за вимірним значенням температури аеросуміші на виході млина ($T_{a.c}$) відповідно до ПІ закону регулювання (див.рис.4.20). Завдання локальному регулятору (T_3) 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 вимірюваного значення завантаженості млина (L). В алгоритмі передбачено захист за такими параметрами: вібрація опори переднього підшипника ($v_{вх}$), перепад тиску на млині (ΔP), температура аеросуміші на виході млина ($T_{a.c}$). 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.

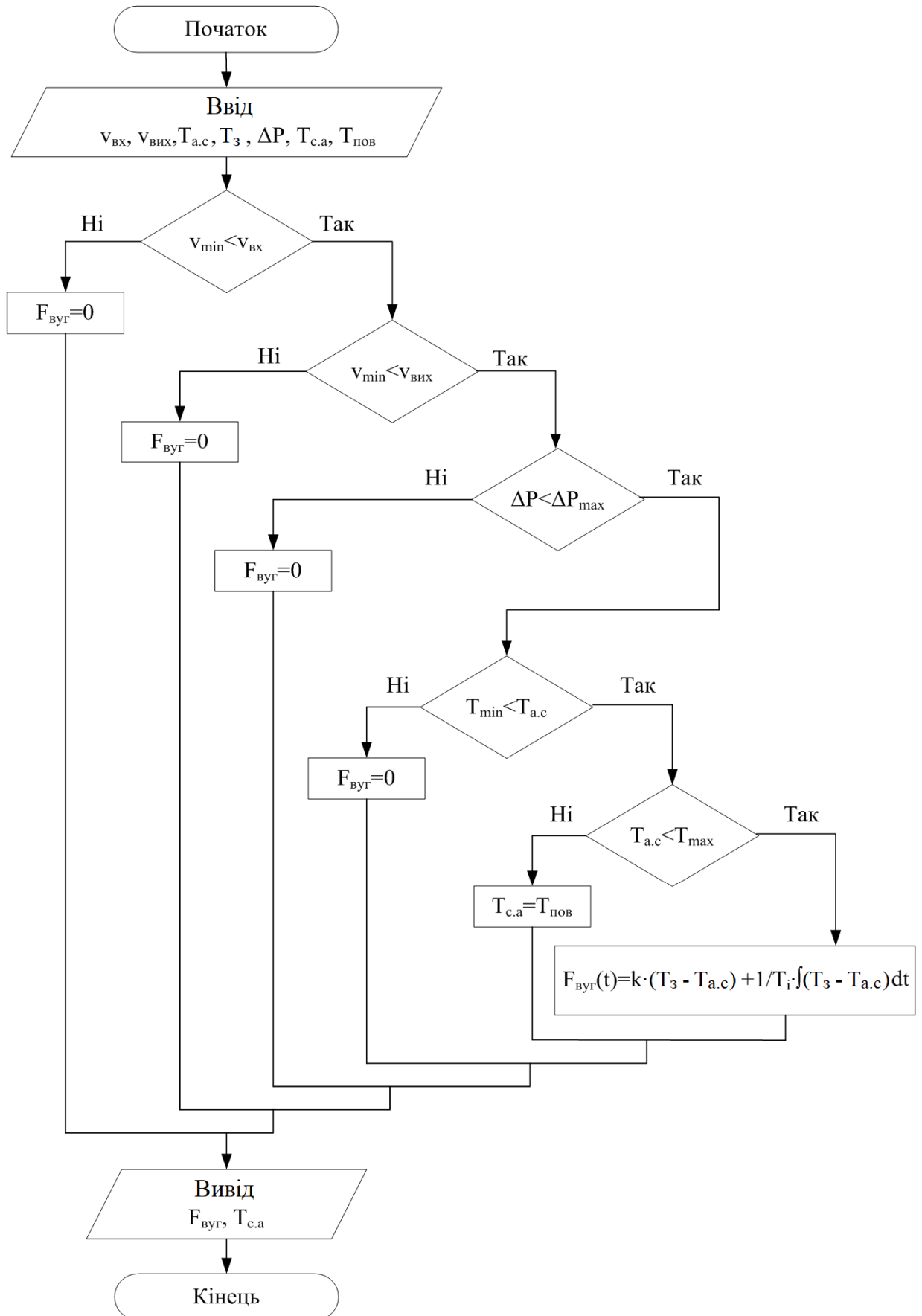


Рис.4.20. Блок-схема запропонованого алгоритму автоматичного керування роботою КБМ.

У запропонованому алгоритмі також передбачено захист від перевищення температури аеросуміші на виході млина максимально допустимого значення для запобігання вибуху. Система захисту діє на зміну температури сушильного агента.

4.2.3. Розрахунок оптимальних параметрів налаштування регулятора

Розрахунок параметрів налаштування регулятора здійснено для КБМ типу Ш-50А, математична модель якого може бути представлена у вигляді таких функцій передачі:

- функція передачі каналом $F_{\text{гуг}}^m - T_{a.c.}$:

$$W_1(p) = \frac{-31,13}{50p+1} e^{-20p}, \quad (4.2)$$

де розмірність коефіцієнта передачі $^{\circ}\text{C}/(\text{кг}/\text{с})$, а розмірність сталої часу та часу запізнення (секунда).

- функція передачі каналом $F_{\text{гуг}}^m - L$:

$$W_2(p) = \frac{7,2}{20p+1}, \quad (4.3)$$

де розмірність коефіцієнта передачі $\% / (\text{кг}/\text{с})$ визначена на основі припущення, що при номінальній розмелювальній продуктивності завантаженість млина становить 50%. Розмірність сталої часу (секунда).

- функція передачі каналом $F_{\text{гуг}}^m - \Delta P$:

$$W_3(p) = \frac{262,6}{60p+1} e^{-100p}, \quad (4.4)$$

де розмірність коефіцієнта передачі $\text{Па}/(\text{кг}/\text{с})$, а розмірність сталої часу та часу запізнення (секунда).

Розрахунок параметрів ПІ-регулятора здійснено для функції передачі КБМ каналом $F_{\text{гуг}}^m - T_{a.c.}$ (4.2).

Розрахунок оптимальних параметрів налаштування ПІ-регулятора виконано за мінімумом другої інтегральної оцінки, ступінь коливальності при цьому становить $m=0,3$. Границя області заданого запасу стійкості САР температури аеросуміші з ПІ-регулятором представлена на рис.4.21. На цьому рисунку зірочкою позначено точку з оптимальними значеннями параметрів налаштування ПІ-регулятора.

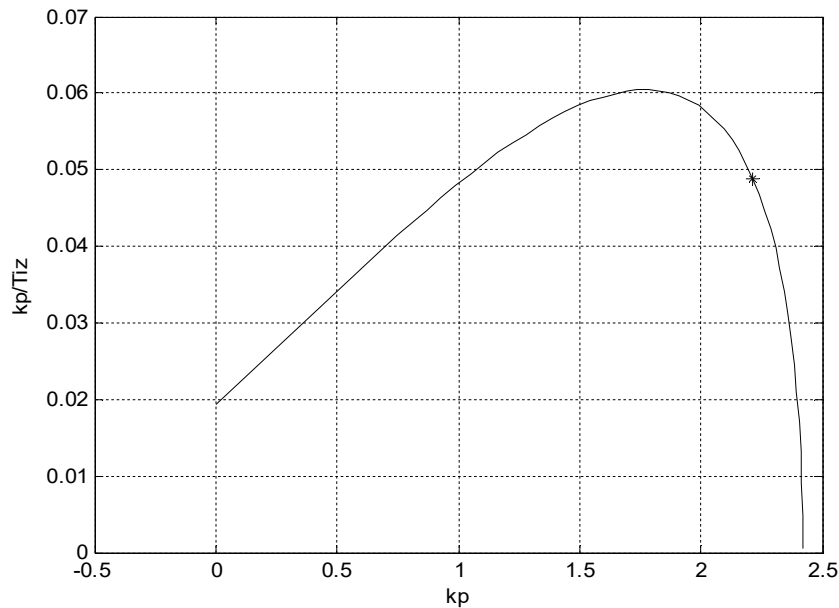


Рис.4.21. Границя області заданого запасу стійкості САР температури аеросуміші з ПІ-регулятором (* - точка з оптимальними значеннями параметрів налаштування регулятора).

Після виконання розрахунків отримано значення параметрів налаштування. Функція передачі ПІ-регулятора в безрозмірній формі:

$$W_{PI}(p) = 2,2143 + \frac{0,0489}{p}. \quad (4.5)$$

Для переведення отриманих значень параметрів ПІ-регулятора з безрозмірної форми у розмірну необхідно їх розділити на коефіцієнт передачі об'єкта регулювання каналом регулюючої дії, який становить $-31,13 \text{ } ^\circ\text{C}/(\text{кг}/\text{с})$.

Моделювання перехідних процесів у системі автоматичного регулювання із розрахованими параметрами регулятора представлено у підрозділі 5.2.

Опис автоматичної системи, у якій впроваджено алгоритм управління роботою кульового барабанного млина для оптимізації його завантаження представлено у додатку А1. 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.

Висновки до розділу 4

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 ($K_{PI} = 30,03 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$, $T_{I3} = 201,98 \text{ с}$). Ці числові значення параметрів налаштування будуть застосовані для дослідження перехідних процесів у замкнутій САР на базі різних схем імпульсних регуляторів.

На основі розробленої моделі КБМ виконано розрахунок параметрів налаштування автоматичного регулятора, при яких досягається мінімум другої інтегральної оцінки перехідного процесу.

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 розмелювальну продуктивність млина при зміні характеристик сирого вугілля.

Запропоновано удосконалений алгоритм автоматичного керування роботою КБМ, відповідно до якого подача сирого вугілля у млин здійснюється за сигналом температури аеросуміші на виході КБМ відповідно до ПІ-закону регулювання. 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 вимірюваного значення завантаженості млина. Розроблений алгоритм забезпечує економію електроенергії, яка витрачається для розмелювання вугілля на ТЕС.

РОЗДІЛ 5

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ З НЕЛІНІЙНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Для керування нелінійними об'єктами необхідно підбирати такі параметри автоматичного регулятора, при яких система автоматичного регулювання буде стійкою. Крім цього, надзвичайно важливим завданням є покращення якісних показників перехідних процесів у системі регулювання при дії різних збурень. Під збуренням розуміють фізичний або хімічний вплив на об'єкт регулювання, що спричиняє відхилення регульованої величини [121]. Збурення часто є випадковими, іноді вони не контролюються і визначаються властивостями початкової сировини. Прикладом цього може бути вологість сирого вугілля, що подається на вхід кульового барабанного млина. Система автоматичного регулювання повинна реагувати на це збурення таким чином, щоб при зміні вологості сирого вугілля забезпечити максимально можливу розмелювальну продуктивність млина із врахуванням усіх обмежень, яких потрібно дотримуватися для захисту млина від аварійної ситуації.

Основними показниками якості перехідних процесів є максимальне динамічне відхилення, час регулювання, статична похибка регулювання, коливальність та перерегулювання [246]-[248], [260]. Визначення цих показників якості для різних налаштувань автоматичного регулятора дає можливість вибрати такі значення параметрів налаштування, при яких перехідний процес буде проходити у відповідності до вимог, що ставляться до систем керування нелінійними об'єктами.

У цьому розділі наведено результати моделювання перехідних процесів у системі автоматичного регулювання з нелінійним тепловим об'єктом із застосуванням різних схем автоматичного регулятора. Досліджено перехідні процеси у системі автоматичного регулювання завантаженості кульового барабанного млина. Крім цього змодельовано похибки автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах та розроблено заходи для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

5.1. Система автоматичного регулювання з нелінійним тепловим об'єктом

Моделювання перехідних процесів у замкнутій САР виконано на основі розробленої моделі об'єкта регулювання (електрична піч, див. підрозділ 3.1) та отриманих параметрів налаштування автоматичного регулятора (ПІ та ПІД закон регулювання, див. підрозділ 4.1). Спрощена схема САР для дослідження перехідних процесів представлена на рис. 5.1. На цьому рисунку зроблено такі позначення: x – вхідна величина ОР (регулююча дія – електрична потужність на вході печі, W), y – вихідна величина ОР (регульований параметр – температура, θ), z – збурення (положення заслінки на лінії подачі повітря у піч, $\mu_{засл}$, див.рис.3.1, рис. 3.2), y_3 – задане значення регульованого параметра.

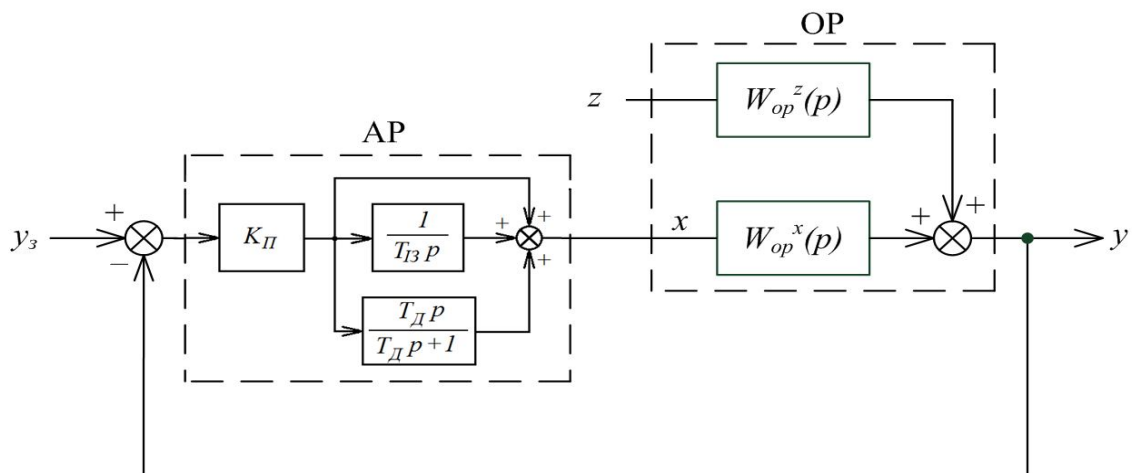


Рис.5.1. Спрощена структурна схема САР на базі ПІД-регулятора.

Моделювання виконано для двох типів збурення:

- стрибкоподібна зміна завдання регулятора (y_3);
- стрибкоподібна зміна положення заслінки на лінії подачі повітря у піч (z).

Для кожної схеми автоматичного регулятора виконано моделювання перехідних процесів у замкнутій САР у такій послідовності:

Крок 1: САР без обмежень;

Крок 2: САР із обмеженням вхідного сигналу ОР (від 0 до 100 %);

Крок 3: САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою виконавчого механізму (ВМ) при досягненні крайнього положення (для імпульсних регуляторів);

Крок 4: САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів у крайніх положеннях ВМ (для імпульсних регуляторів);

Крок 5: САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів та зупинкою інтегральної складової ПІ закону регулювання у крайніх положеннях ВМ;

Крок 6: САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів, зупинкою інтегральної складової ПІ закону регулювання та із введеною зоною нечутливості на вході регулятора.

На кожному кроці моделювання визначено показники якості перехідних процесів, а саме максимальне динамічне відхилення (A_1), перерегулювання (ϕ) та час регулювання (T_p) для заданої допустимої похибки регулювання $0,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Для ПІД закону регулювання виконано моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на основі скоректованої моделі об'єкта регулювання та отриманих параметрів налаштування автоматичного ПІД-регулятора (див. 4.1).

Для кожної схеми автоматичного регулятора виконано моделювання перехідних процесів у замкнутій САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів, зупинкою інтегральної складової ПІД закону регулювання та із введеною зоною нечутливості на вході регулятора. Визначено показники якості перехідних процесів для кожної схеми.

5.1.1. САР на базі аналогового ПІД-регулятора

Перший перехідний процес змодельовано для стрибкоподібної зміни завдання регулятору від $32,5359\text{ }^\circ\text{C}$ до $70\text{ }^\circ\text{C}$. Початкове значення завдання відповідає стану рівноваги ОР при нульовому положенні ЛАТРа і воно отримане на основі рівняння статичної характеристики (3.1). Величина зміни завдання зумовлена необхідністю

дослідити поведінку САР у тих випадках, коли регулююча дія досягає крайнього значення.

На основі змодельованого перехідного процесу у замкнутій САР з аналоговим ПІ-регулятором без обмежень (крок 1) встановлено, що тривалість перехідного процесу становить 424 с при заданій допустимій похибці регулювання ($\pm 0,5$ °С), перша амплітуда (A_1) – 8,41 °С, перерегулювання (ϕ) – 19 %. Вхідний сигнал ОР змінюється в діапазоні від -100 до 1100 %.

Оскільки на практиці вхідний сигнал ОР може змінюватися в діапазоні від 0 до 100%, то на вході ОР встановлено нелінійний елемент “насичення” для обмеження для зміни сигналу (0...100%). На основі змодельованого перехідного процесу із введеним обмеженням (крок 2) встановлено, що перехідний процес триває 2011 с, перша амплітуда (A_1) становить 13,4 °С, перерегулювання (ϕ) – 0 %. Отже, введення обмеження для вхідного сигналу ОР приводить до збільшення тривалості перехідного процесу та збільшення першої амплітуди.

В тих випадках, коли вхідний сигнал ОР досягає крайнього значення (0 або 100 %) інтегральна складова ПІ-регулятора продовжує змінюватись. Для усунення цього ефекту на вході інтегратора, що відповідає за інтегральну складову, встановлено послідовно два ключі (нормально замкнуті). Один ключ спрацьовує (розмикається) при досягненні вхідним сигналом ОР верхньої межі, а другий – при досягненні нижньої межі.

На основі змодельованого перехідного процесу із зупинкою інтегральної складової регулятора, встановлено, що перехідний процес триває 814 с, перша амплітуда (A_1) становить 0 °С, перерегулювання (ϕ) – 0 %. Отже, зупинка дії інтегральної складової автоматичного регулятора приводить до зменшення тривалості перехідного процесу та аперіодичного характеру перехідного процесу, тобто до покращення якості регулювання, порівняно з попереднім кроком.

Якісні показники змодельованих перехідних процесів для різних варіантів САР з аналоговим регулятором представлені у таблиці 5.1. Порівняння перехідного процесу для початкової САР та для САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою інтегральної складової АР представлено на рис.5.2.

Таблиця 5.1

Якісні показники перехідних процесів для САР з аналоговим ПІ-регулятором

№ кроку	Варіант САР	T_p , с	A_1	φ , %
1	Початкова САР	424	8,41	19
2	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР	2011	13,4	0
3	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою інтегральної складової АР	814	0	0

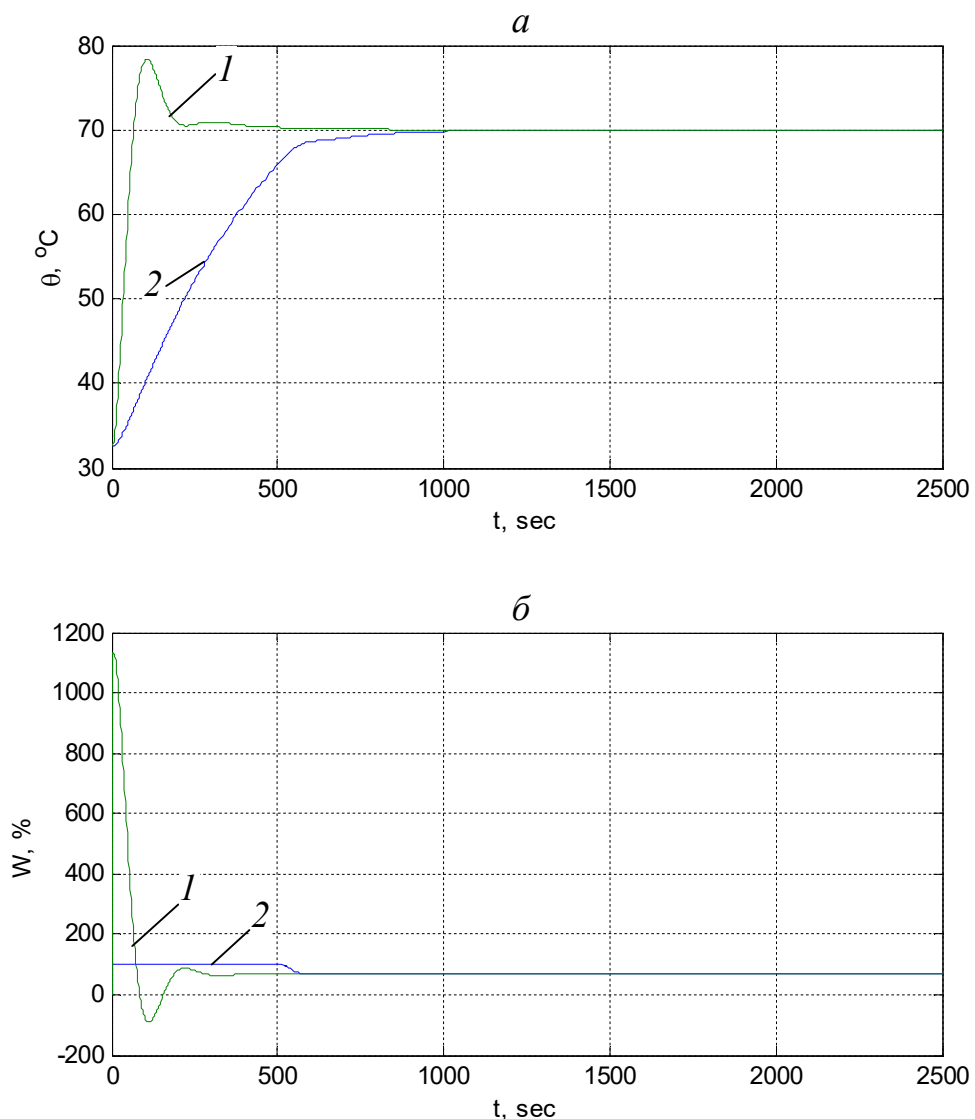


Рис. 5.2. Порівняння перехідних процесів для САР без обмежень (1) та для САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою інтегральної складової АР (2):

а) вихідний сигнал ОР; б) вхідний сигнал ОР.

У деяких контролерах на вході алгоритму аналогового ПД-регулювання встановлено нелінійний елемент “зона нечутливості”. Структурна схема САР з аналоговим ПІ-регулятором із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою інтегральної складової АР і з зоною нечутливості в середовищі SIMULINK представлена на рис.5.3. На основі змодельованого перехідного процесу у САР з аналоговим ПІ-регулятором із зоною нечутливості шириною $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (від $-0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$) встановлено, що введення зони нечутливості приводить до виникнення статичної похибки регулювання, яка у нашому випадку дорівнює $-0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, що відповідає половині ширини зони нечутливості.

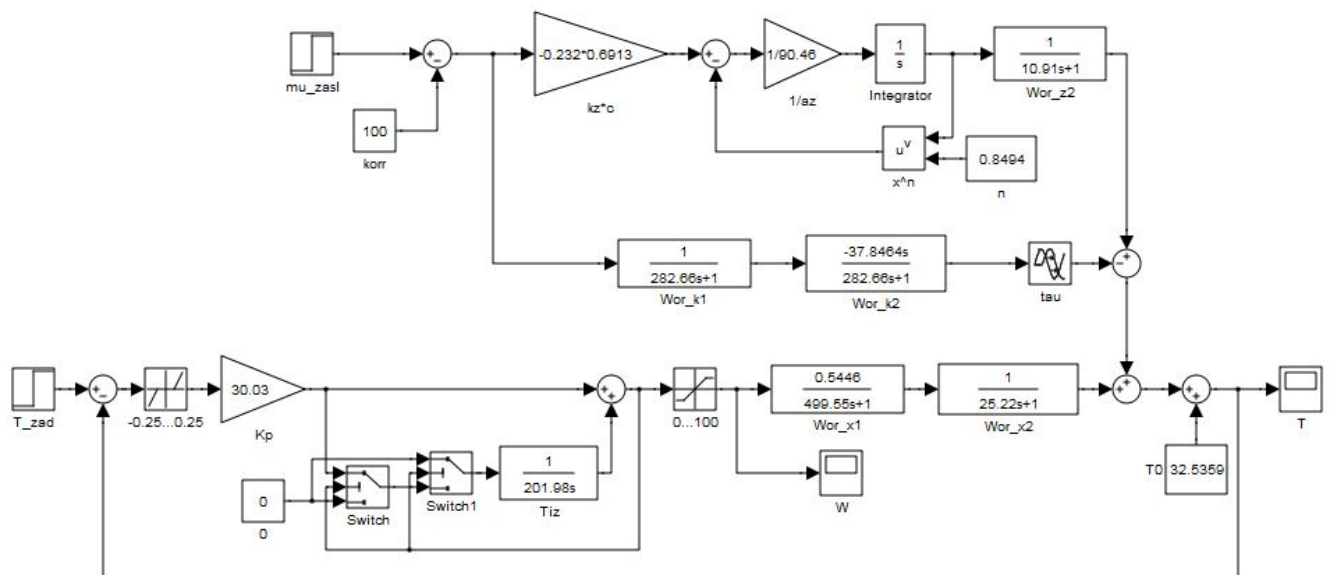


Рис.5.3. Структурна схема САР з аналоговим ПІ-регулятором із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою інтегральної складової АР і з зоною нечутливості в середовищі SIMULINK.

Отже, змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Крім збурення завданням регулятора було також змодельовано перехідний процес для збурення шляхом зміни витрати повітря через піч. Збурення нанесено на 1500-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %. На основі змодельованого перехідного процесу встановлено, що другий перехідний процес триває 122 с, перша амплітуда (A_1) становить $1,75\text{ }^{\circ}\text{C}$, перерегулювання (ϕ) – 0 %.

5.1.2. САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі імпульсного ПД-регулятора із подвійним диференціюванням (у режимі ПІІ закону регулювання), виконано розрахунок параметрів схеми регулятора. Ширина зони неоднозначності трипозиційного реле, розрахована за формулами (1.4)-(1.6) для мінімальної тривалості імпульсу 0,3 с та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження 0,25 °С, становить 0,0330 °С. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,0330$ °С, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$. Налаштування параметрів від'ємного зворотного зв'язку у схемі регулятора, розраховані за формулами (1.2), (1.3): $K_{B33}=0,2242$ °С/%, $T_{B33}=T_{I3}=201,98$ с.

На основі змодельованого перехідного процесу у САР без обмежень (крок 1) при збуренні зміною завдання регулятору до 70 °С (від 32,5259°С) встановлено, що перехідний процес триває 666 с при заданій точності регулювання ($\pm 0,5$ °С), перша амплітуда (A_1) становить 22,4 °С, перерегулювання (ϕ) – 48 %. Також визначено, що вхідний сигнал ОР (положення виконавчого механізму) змінюється в діапазоні від -250 до 500 %. Було введено обмеження для зміни сигналу на вході ОР (0...100%) та виконано моделювання (крок 2).

На основі змодельованого перехідного процесу (крок 2) встановлено, що перехідний процес триває 1667 с, перша амплітуда (A_1) становить 10,4 °С, перерегулювання (ϕ) – 0 %.

Крім обмеження вхідного сигналу ОР необхідно також забезпечити зупинку виконавчого механізму (ВМ) при досягненні крайніх положень, оскільки спрацьовують кінцеві вимикачі. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ (крок 3), встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичним, час регулювання дорівнює 936 с.

В автоматичних регуляторах передбачають наявність вхідних дискретних сигналів (від кінцевих вимикачів), котрі припиняють подачу імпульсів на виході регулятора у випадках, коли виконавчий механізм знаходиться у крайньому положенні. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу

ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ (крок 4), встановлено, що перехідний процес триває 751 с, перша амплітуда (A_1) становить 1 °С, перерегулювання (φ) – 0 %.

Погіршення якості перехідного процесу пояснюється тим, що при досягненні крайнього положення виконавчого механізму припиняються імпульси на виході регулятора, але при цьому інтегратор у від'ємному зворотному зв'язку продовжує працювати, що приводить до збільшення вхідного сигналу трипозиційного реле і відповідно до погіршення якості перехідного процесу. При досягненні крайнього положення виконавчого механізму необхідно не лише припинити подачу імпульсів на виході регулятора, а й зупинити дію інтегратора у від'ємному зворотному зв'язку. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ та зупинкою інтегратора у зворотному зв'язку трипозиційного реле АР (крок 5), встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичним і час регулювання дорівнює 813 с.

У САР на базі імпульсних ПД-регуляторів може виникати автоколивний перехідний процес, що зумовлене наявністю трипозиційного реле у складі АР.

Усунути автоколивання у даній схемі можна двома способами:

- встановити на вході схеми нелінійний елемент “зона нечутливості” ($\Delta_{HЧ1}$);
- збільшити зону нечутливості трипозиційного реле, що входить у склад імпульсного регулятора.

Було змодельовано цих два варіанти (крок 6). У першому випадку автоколивання відсутні, перехідний процес є гранично аперіодичним і триває 934 с. Статична похибка регулювання становить -0,14 °С. У другому випадку автоколивання також відсутні, перехідний процес є гранично аперіодичним і триває 963 с. Статична похибка регулювання становить +0,06 °С.

Структурна схема САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ, зупинкою інтегратора у зворотному зв'язку трипозиційного реле АР та із введеною зоною нечутливості на вході регулятора $\Delta_{HЧ1} = 0,5$ °С (від -0,25 до +0,25 °С) у середовищі SIMULINK представлена на рис.5.4.

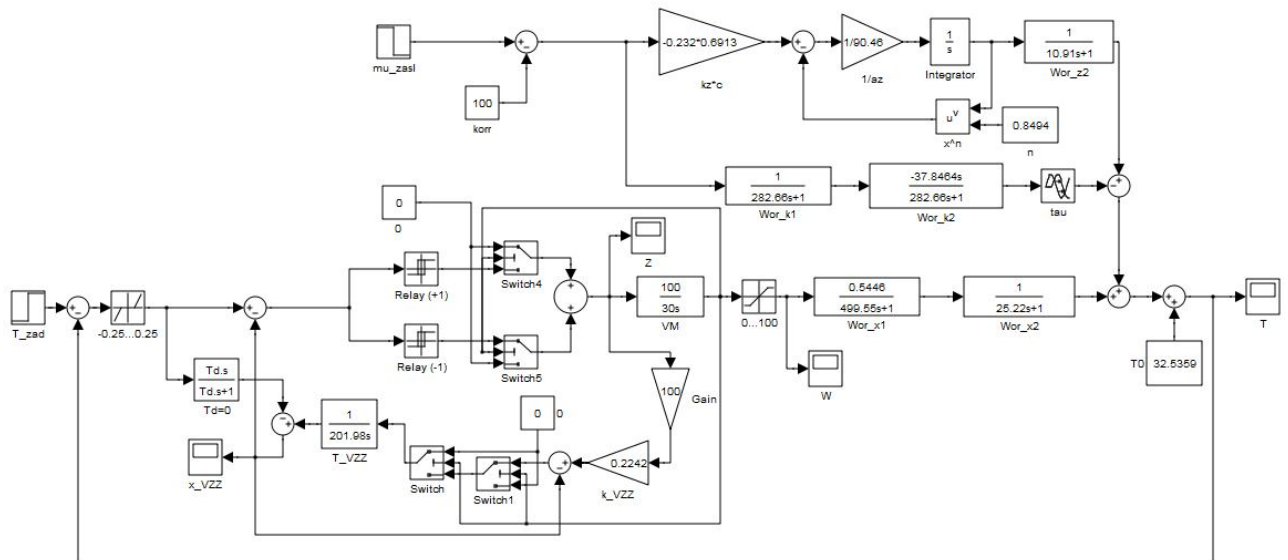


Рис.5.4. Структурна схема САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням в середовищі SIMULINK.

Якісні показники змодельованих перехідних процесів для різних варіантів САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням представлені у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2

Якісні показники перехідних процесів для САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням (ПІ закон регулювання)

№ кроку	Варіант САР	T_p , с	A_1	φ , %
1	САР без обмежень	666	22,4	48
2	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР	1667	10,4	0
3	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ	936	0	0
4	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході регулятора	751	1	0
5	САР із обмеженням вх. сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР та зупинкою інтегратора	813	0	0
6	САР із зоною нечутливості на вході регулятора	934	0	0
7	САР із збільшеною зоною нечутливості у трипозиційному реле	963	0	0

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням представлено на рис.5.5.

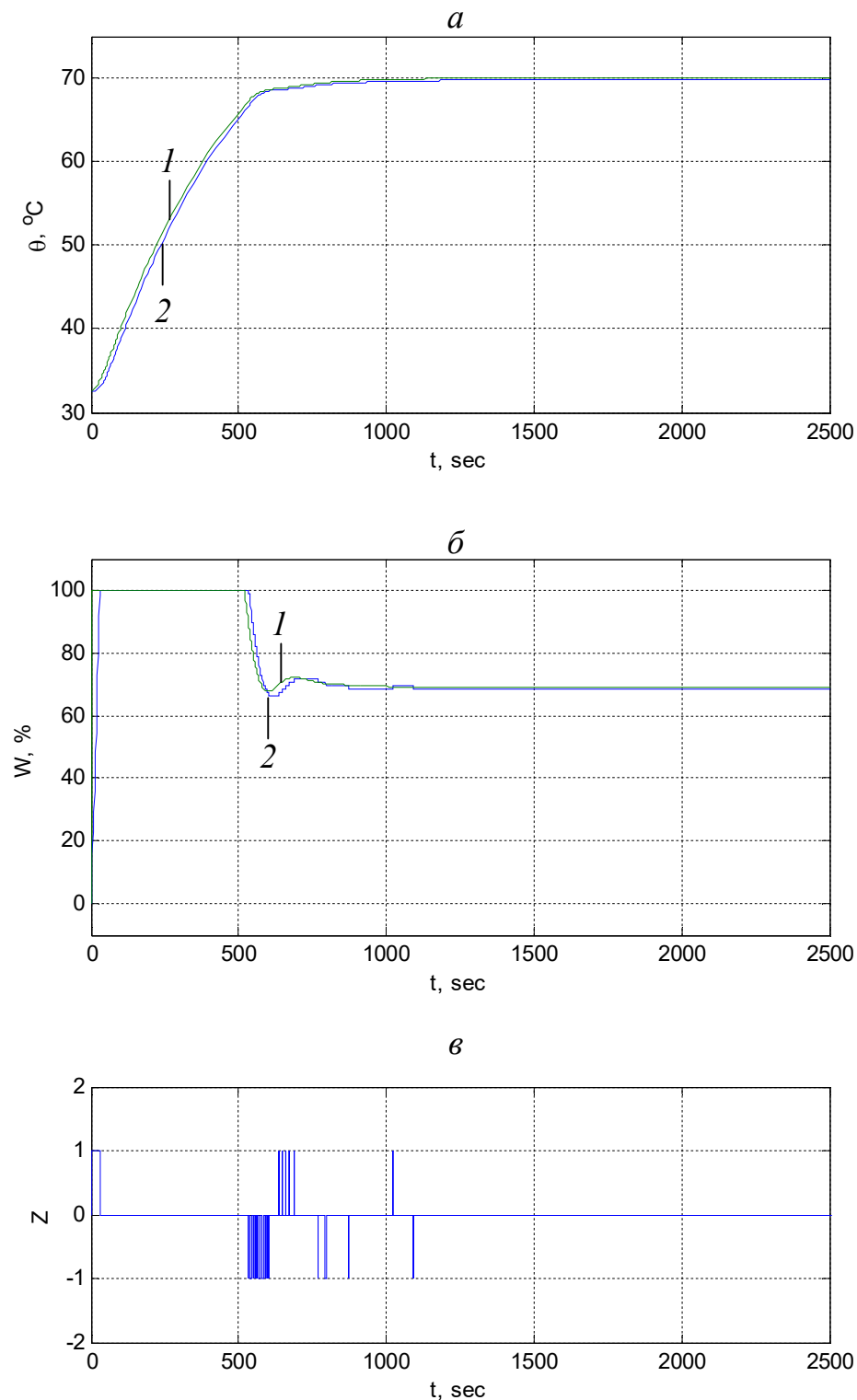


Рис. 5.5. Порівняння перехідних процесів при збуренні завданням регулятора для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням (2):
а) вихідний сигнал ОР; б) вхідний сигнал ОР; в) імпульси на виході регулятора.

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

$$\sigma_{САР} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (X_{имп} - X_{ан})^2 dt, \quad (5.1)$$

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

Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.5 *a*, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,2512 °С.

Отже, змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес для збурення шляхом зміни витрати повітря через піч. Збурення нанесено на 2500-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес триває 146 с, перша амплітуда (A_1) становить 2 °С, перерегулювання (ϕ) – 0 %. Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням представлено на рис.5.6.

Для перехідного процесу зображеного на рис.5.6 *a* середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,0309 °С.

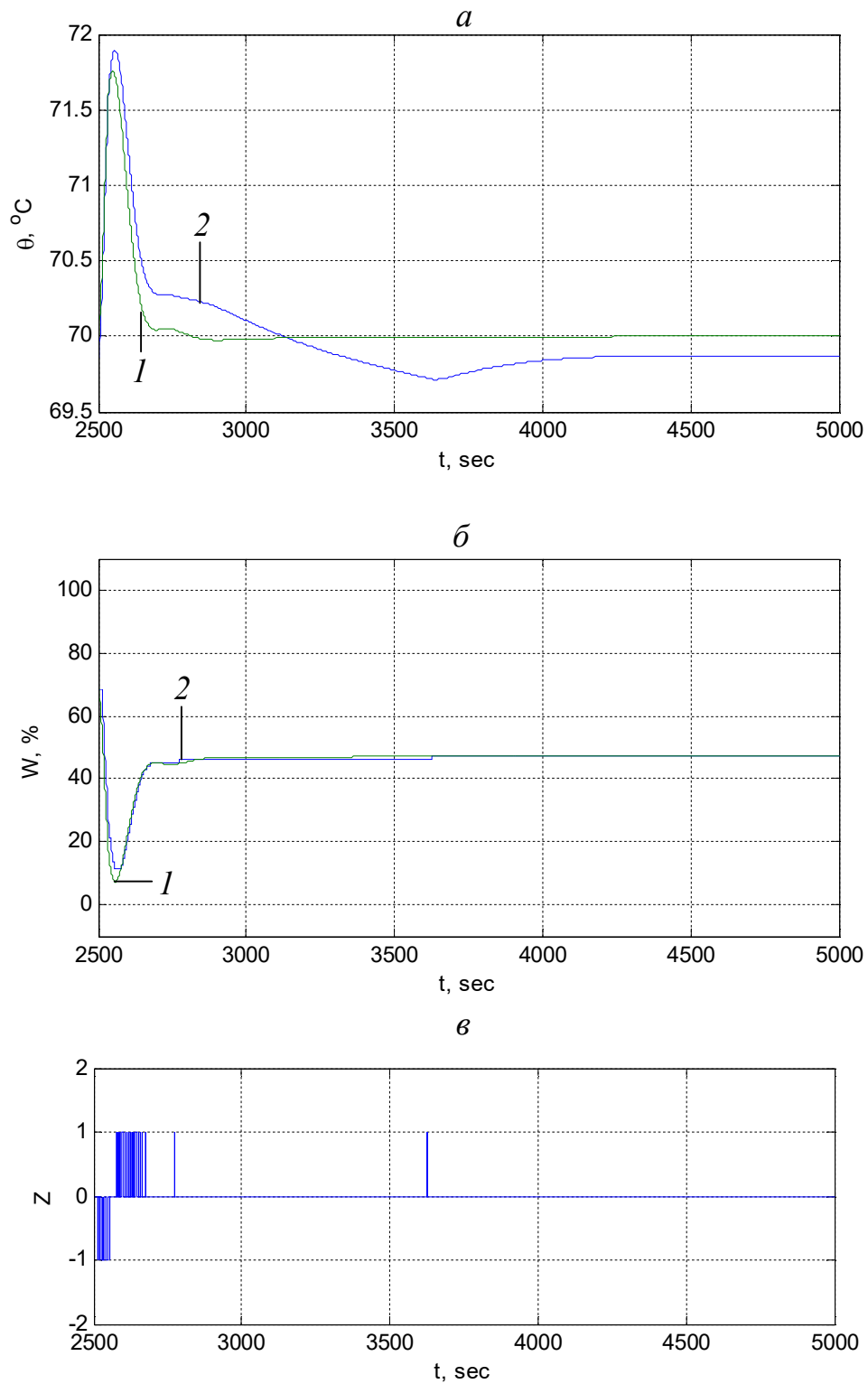


Рис. 5.6. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі імпульсного ПД-регулятора із подвійним диференціюванням (у режимі ПД закону регулювання), виконано розрахунок параметрів схеми регулятора для налаштувань відповідно до скоректованої моделі ОР. Ширина зони неоднозначності трипозиційного реле, розрахована за формулами (1.4)-(1.6) для мінімальної тривалості імпульсу 0,3 с та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження 0,25 °С, становить 0,1004 °С. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,1004$ °С, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$. Налаштування параметрів від'ємного зворотного зв'язку у схемі регулятора, розраховані за формулами (1.2), (1.3): $K_{ВЗЗ}=0,2664$ °С/%, $T_{ВЗЗ}=T_{ІЗ}=79,04$ с.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням представлено на рис.5.7. Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.7 а, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 7,6133 °С, а час регулювання для імпульсного регулятора становить 149 с.

Змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес при збуренні каналом збурення. Збурення нанесено на 500-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням представлено на рис.5.8. На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес для імпульсного регулятора триває 157 с, а середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,0598 °С.

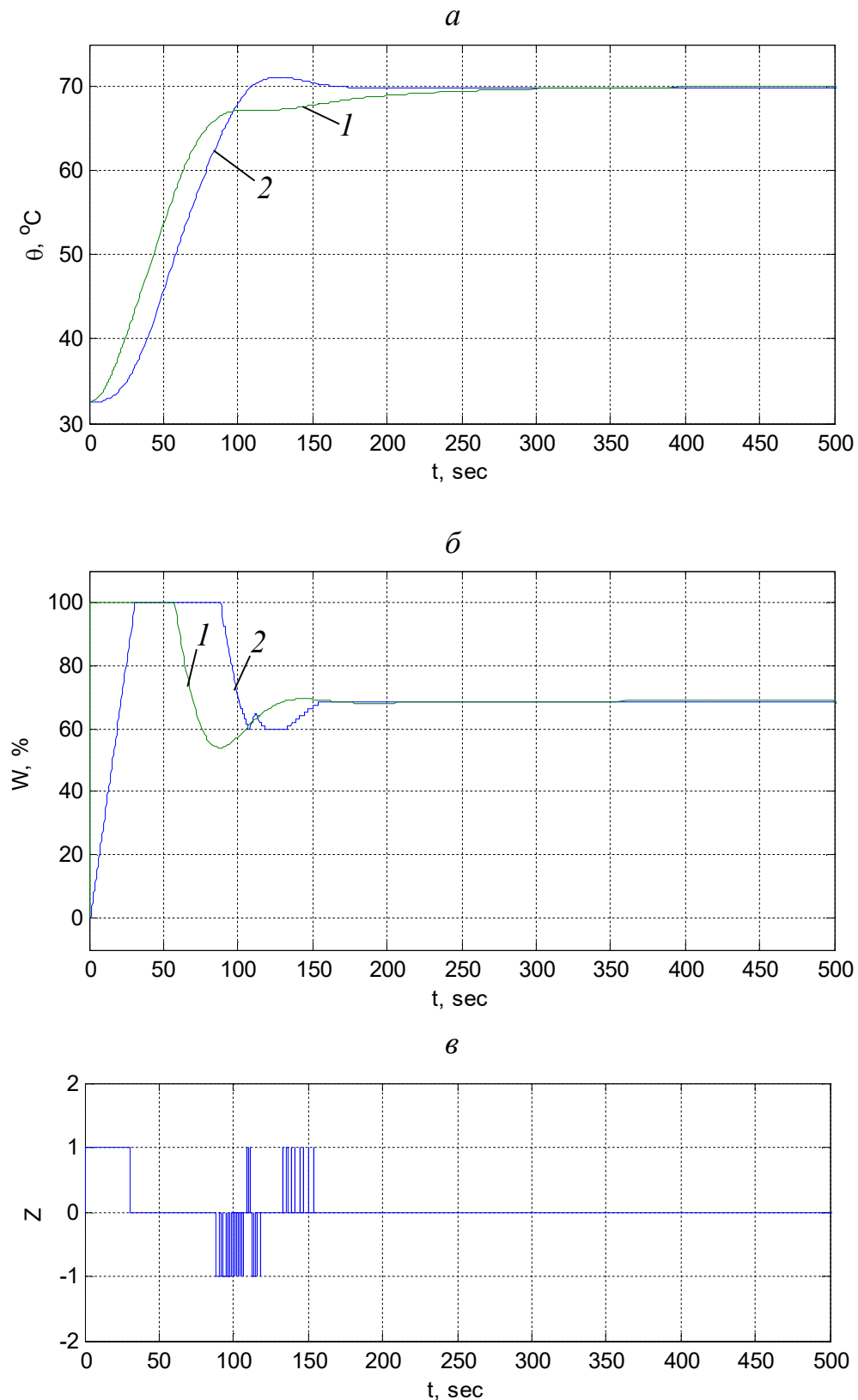


Рис. 5.7. Порівняння перехідних процесів при збуренні завданням регулятора для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

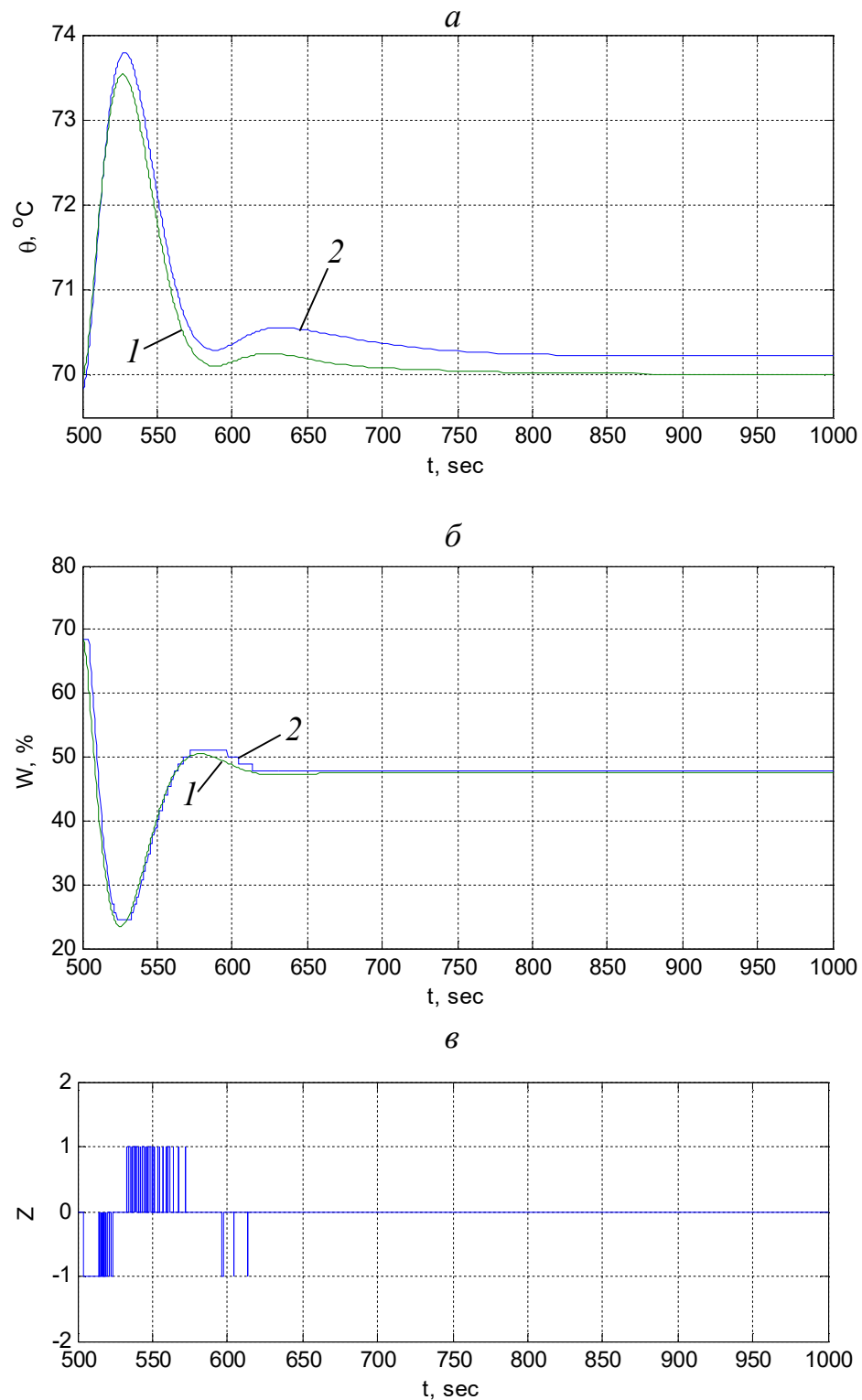


Рис. 5.8. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі імпульсного ПІД-регулятора з подвійним диференціюванням (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

5.1.3. САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та ШІМ

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором виконано розрахунок параметрів схеми регулятора. Ширина зони неоднозначності, розрахована за формулами (1.7),(1.8) для мінімальної тривалості імпульсу 0,3 с та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$, становить 0,2888 %. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,2888\text{ }%$, $\Delta_{HЧ}=2\cdot\Delta_{HO}$.

На основі змодельованого перехідного процесу для ПІ закону регулювання у САР без обмежень (крок 1) при збуренні зміною завдання регулятору до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (від $32,5259\text{ }^{\circ}\text{C}$) встановлено, що перехідний процес є розбіжним і САР є нестійкою. Це пояснюється тим, що швидкість зміни інтегральної складової аналогового ПД-регулятора є більшою за швидкість переміщення виконавчого механізму. Швидкість зміни інтегральної складової аналогового ПД-регулятора в початковий момент становить $(70 - 32,5359)\times 30,03/201,98 = 5,57\text{ }%/с$, а швидкість переміщення виконавчого механізму – $100/30=3,33\text{ }%/с$. Крім цього статичні та динамічні властивості об'єкта регулювання також впливають на тип перехідного процесу.

Вхідний сигнал ОР (положення виконавчого механізму) змінюється в діапазоні від -500 до 500 % і цей діапазон постійно розширюється, оскільки САР є нестійкою. Введемо обмеження для зміни сигналу на вході ОР (0...100%). На основі змодельованого перехідного процесу (крок 2) встановлено, що САР є стійкою і перехідний процес триває 2066 с (при заданій допустимій похибці регулювання $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), перша амплітуда (A_1) становить $13,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, перерегулювання (φ) – 0 %.

Крім обмеження вхідного сигналу ОР необхідно також забезпечити зупинку виконавчого механізму при досягненні крайніх положень, оскільки спрацьовують кінцеві вимикачі. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ (крок 3), встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичним, час регулювання дорівнює 894 с.

В автоматичних регуляторах передбачають наявність вхідних дискретних сигналів (від кінцевих вимикачів), котрі припиняють подачу імпульсів на виході регулятора у тих випадках, коли виконавчий механізм знаходиться у крайньому положенні. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ (крок 4), встановлено, що перехідний процес триває 2067 с, перша амплітуда (A_1) становить 13,7 °С, перерегулювання (φ) – 0 %.

Погіршення якості перехідного процесу пояснюється тим, що при досягненні крайнього положення виконавчого механізму припиняються імпульси на виході регулятора, але інтегральна складова аналогового ПІД-регулятора продовжує змінюватись і з виходу блоку диференціювання, встановленого на виході аналогового ПІД-регулятора, продовжує поступати сигнал на вхід ШІМ, що приводить до погіршення якості перехідного процесу. Для усунення цього небажаного ефекту необхідно ввести обмеження вихідного сигналу аналогового ПІД-регулятора (0...100 %) та зупинити дію інтегральної складової ПІ закону регулювання при досягненні крайніх значень вихідного сигналу аналогового регулятора. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ, введеним обмеженням вихідного сигналу аналогового ПІД-регулятора (0...100 %) та зупинкою інтегральної складової ПІ закону регулювання при досягненні крайніх значень вихідного сигналу аналогового регулятора (крок 5), було встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичний, час регулювання становить 822 с. Крім цього у стані рівноваги у САР спостерігається автоколивний перехідний процес із невеликою амплітудою, що зумовлене наявністю трипозиційного реле у складі автоматичного регулятора. Тривалість імпульсів “більше”/“менше” під час автоколивань становить 0,3 с.

Для усунення автоколивань, на вході імпульсного регулятора встановлюють нелінійний елемент “зона нечутливості” ($\Delta_{нч1}$). Змодельовавши перехідний процес із “зоною нечутливості” на вході регулятора було встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичний і час регулювання дорівнює 967 с. Статична похибка регулювання в стані рівноваги є незначна (-0,16 °С).

Структурна схема САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ, введеним обмеженням вихідного сигналу аналогового ПІД-регулятора (0...100 %), зупинкою інтегральної складової ПІ закону регулювання при досягненні крайніх значень вихідного сигналу аналогового регулятора та із введеною зоною нечутливості на вході регулятора $\Delta_{нчл} = 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$ (від $-0,25$ до $+0,25 \text{ } ^\circ\text{C}$) у середовищі SIMULINK представлена на рис.5.9.

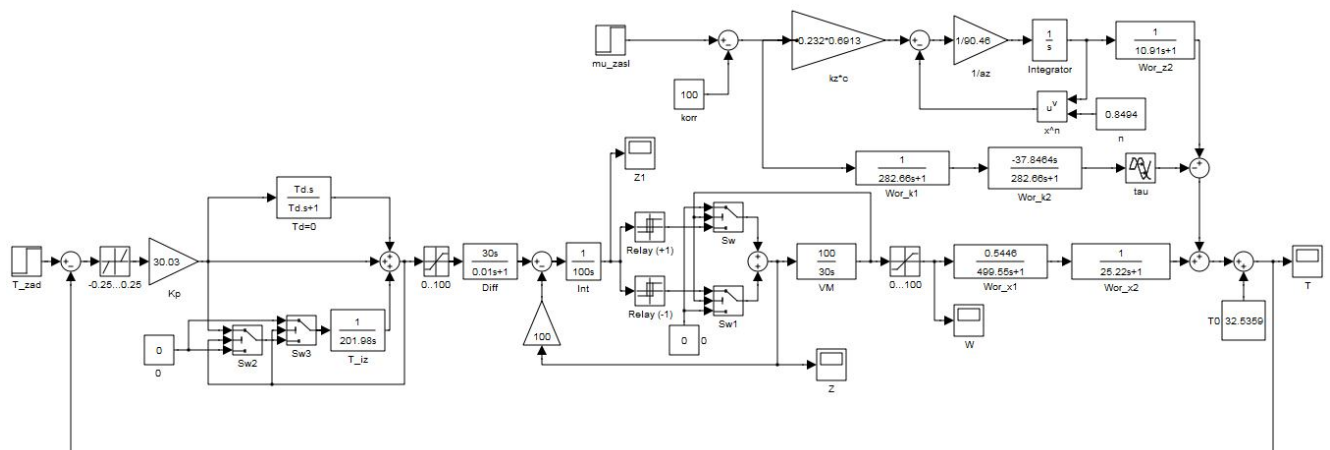


Рис. 5.9. Структурна схема САР на базі ПІД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором в середовищі SIMULINK.

Якісні показники змодельованих перехідних процесів для різних варіантів САР на базі ПІД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором представлені у таблиці 5.3.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором представлено на рис.5.10.

Для кількісної оцінки відхилення перехідного процесу у САР на базі ПІД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором від

перехідного процесу у САР з аналоговим регулятором розрахуємо середньоквадратичне відхилення. Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.10 *a*, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,2654 °С.

Таблиця 5.3

Якісні показники перехідних процесів для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором (ПІ закон регулювання)

№ кроку	Варіант САР	T_p , с	A_1	ϕ , %
1	САР без обмежень	-	47,9	145
2	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР	2066	13,7	0
3	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ	894	0	0
4	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів	2067	13,7	0
5	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою інтегральної складової аналогового ПІ-регулятора	822	0	0
6	САР із зоною нечутливості на вході регулятора	967	0	0

Змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес для збурення шляхом зміни витрати повітря через піч. Збурення нанесено на 2500-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

Порівняння перехідного процесу при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором представлено на рис.5.16.

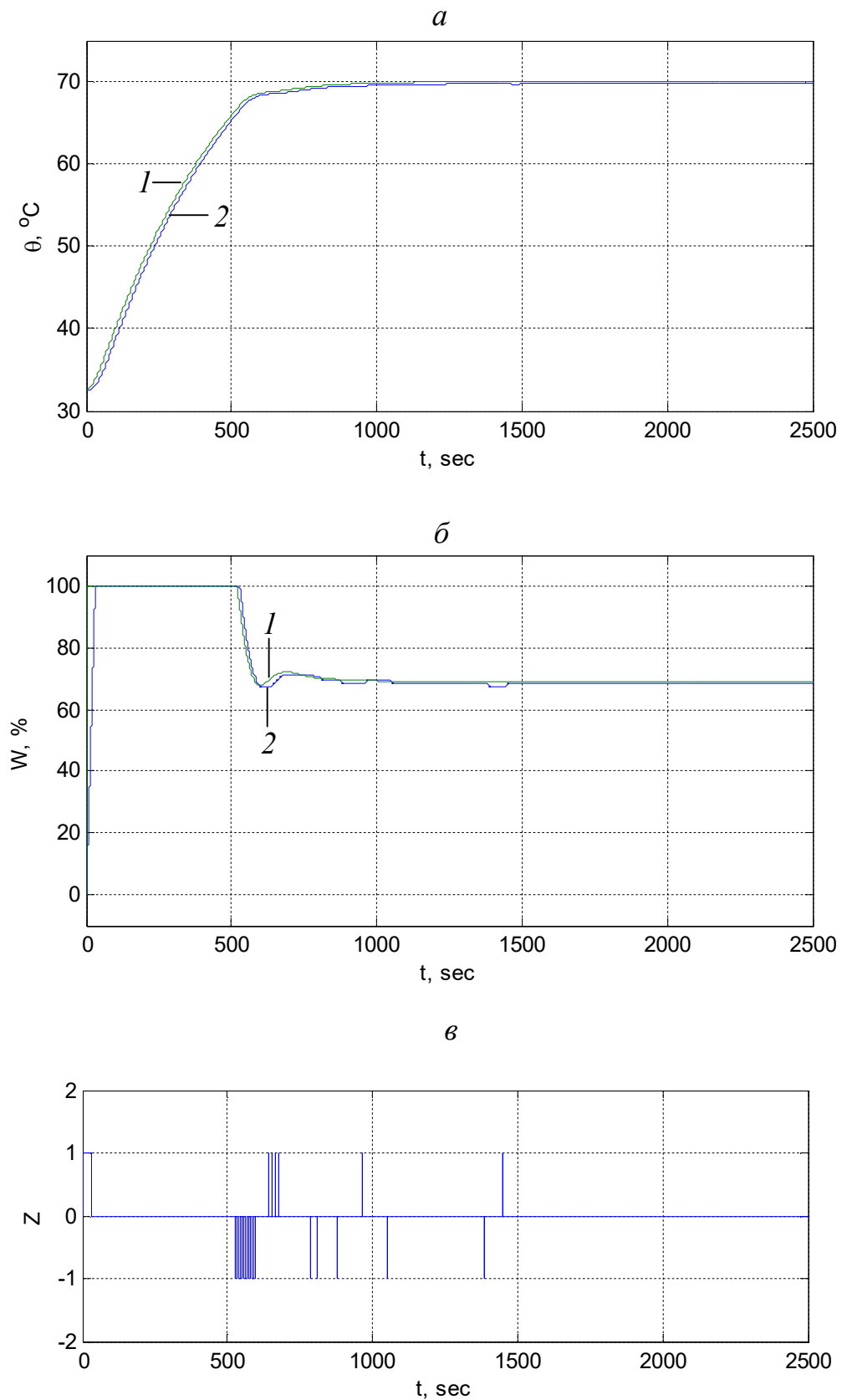


Рис. 5.10. Порівняння перехідних процесів для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та ШІМ (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

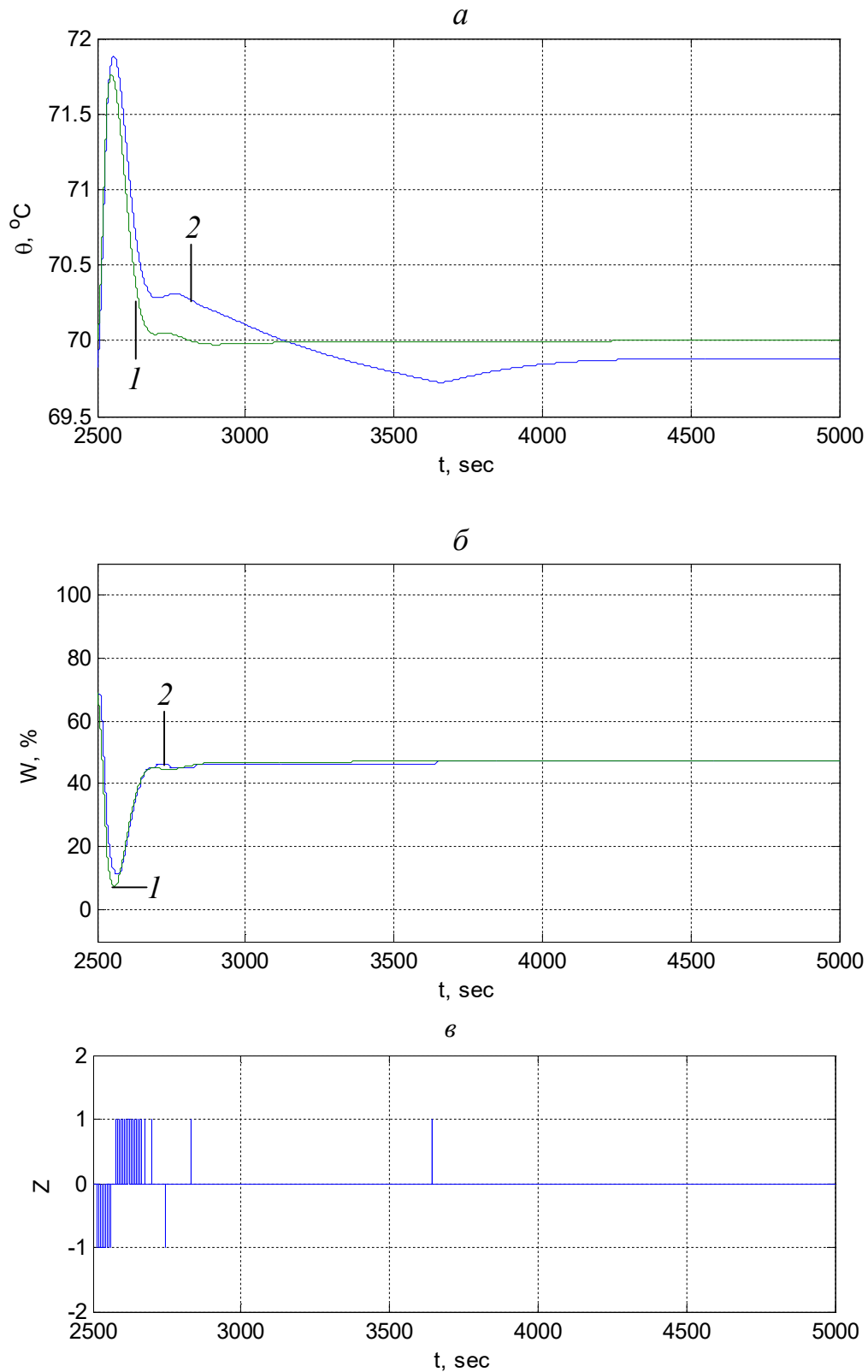


Рис. 5.11. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та ШІМ (2):

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

На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес триває 146 с, перша амплітуда (A_1) становить 2,1 °С, перерегулювання (ϕ) – 0 %. Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.11 *a*, середньоквадратичне відхилення σ_{CAP} становить 0,0301 °С.

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором (у режимі ПД закону регулювання), виконано розрахунок параметрів схеми регулятора для налаштувань згідно скоректованої моделі ОР. Ширина зони неоднозначності трипозиційного реле, розрахована за формулами (1.7),(1.8) для мінімальної тривалості імпульсу 0,3 с та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження 0,25 °С, становить 0,2906 °С. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,2906$ °С, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі аналогового ПД-регулятора з широтно-імпульсним модулятором представлено на рис.5.12. Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.12 *a*, середньоквадратичне відхилення σ_{CAP} становить 6,4802 °С, а час регулювання для імпульсного регулятора становить 318 с.

Змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес при збуренні каналом збурення. Збурення нанесено на 800-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та імпульсним перетворювачем представлено на рис.5.13. На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес для імпульсного регулятора триває 141 с, а середньоквадратичне відхилення σ_{CAP} становить 0,048 °С.

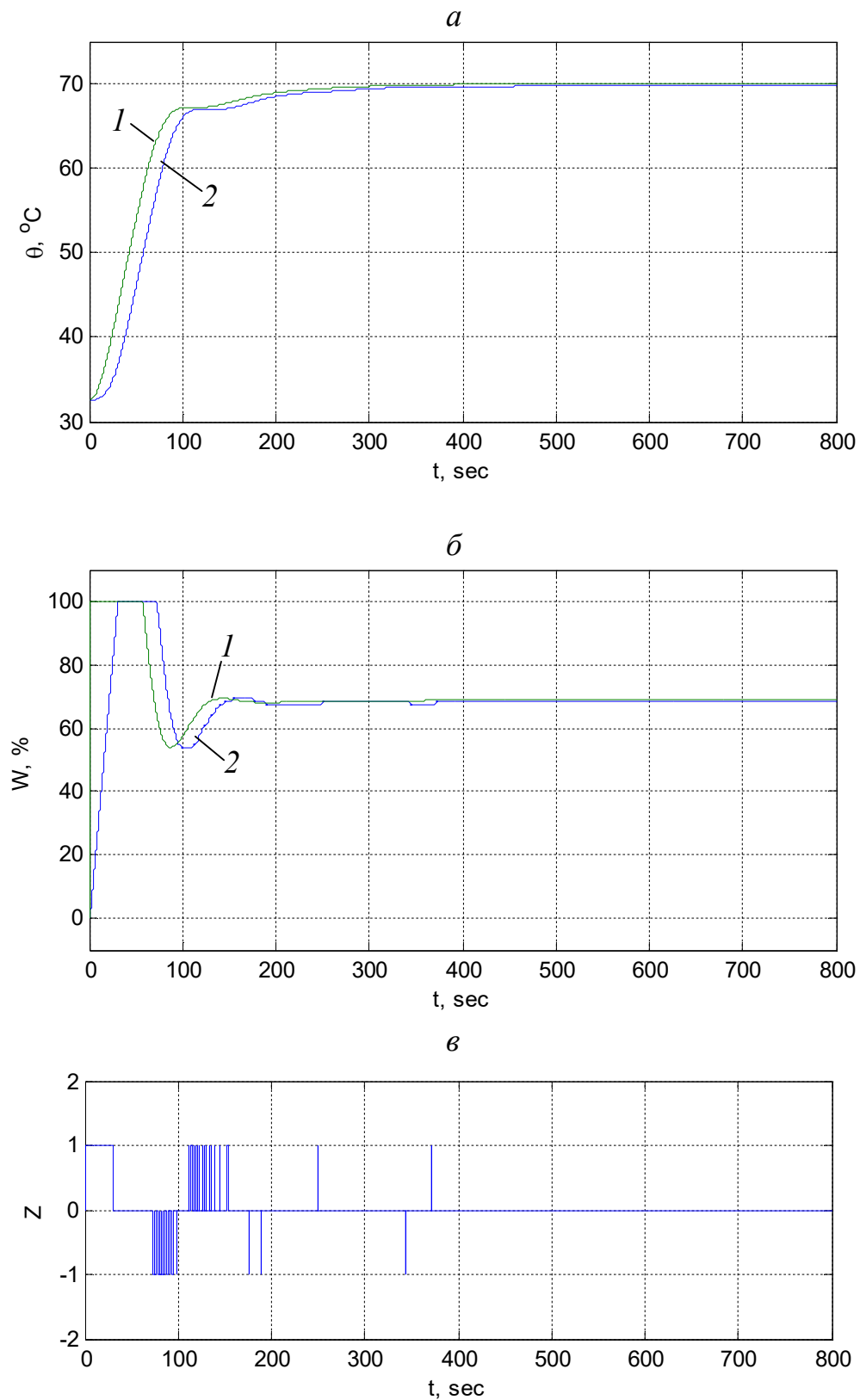


Рис. 5.12. Порівняння перехідних процесів при збуренні завданням регулятора для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

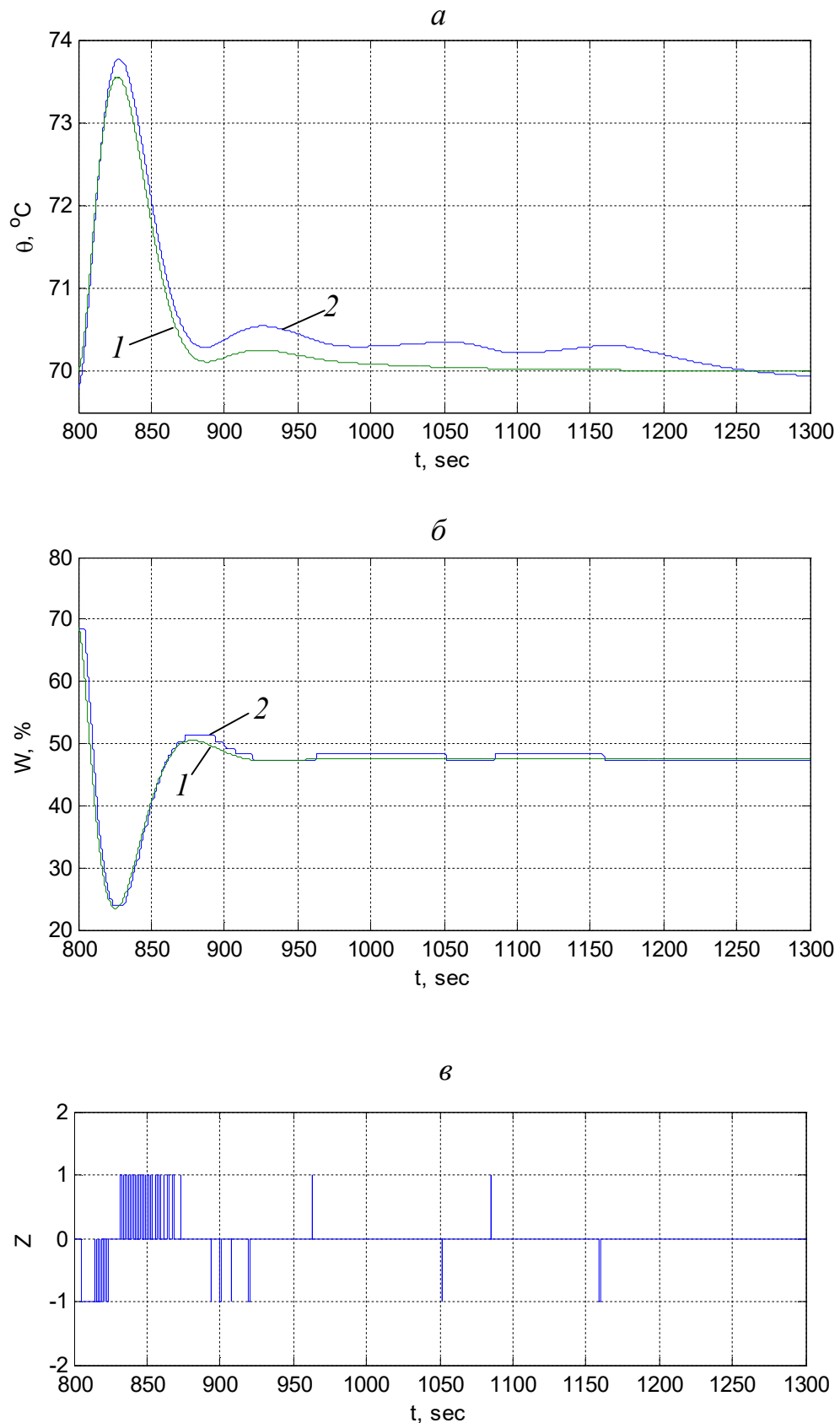


Рис. 5.13. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПД-регулятора з диференціатором та широтно-імпульсним модулятором (2):
 а) вихідний сигнал ОР; б) вхідний сигнал ОР; в) імпульси на виході регулятора.

5.1.4. САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем, виконано розрахунок параметрів схеми імпульсного перетворювача. Ширина зони неоднозначності трипозиційного реле, розрахована за формулою (1.9) для мінімальної тривалості імпульсу 0,3 с та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження 0,25 °С, становить 0,9888 %. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,9888 \%$, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$.

На основі змодельованого перехідного процесу у САР без обмежень (крок 1) для ПІ закону регулювання при збуренні зміною завдання регулятору до 70 °С (від 32,5259°С) встановлено, що перехідний процес є розбіжним і САР є нестійкою. Це пояснюється тим, що інтегратор у від'ємному зворотному зв'язку трипозиційного реле має фіксовану швидкість зміни свого вихідного сигналу і він не встигає скомпенсувати сигнал, що поступає від аналогового аналогового ПІД-регулятора на суматор перед трипозиційним реле. Тобто швидкість зміни інтегральної складової аналогового ПІД-регулятора є більшою за швидкість переміщення виконавчого механізму. Швидкість зміни інтегральної складової аналогового ПІД-регулятора в початковий момент становить $(70 - 32,5359) \times 30,03 / 201,98 = 5,57 \%$ /с, а швидкість переміщення виконавчого механізму – $100 / 30 = 3,33 \%$ /с. Крім цього статичні та динамічні властивості об'єкта регулювання також впливають на тип перехідного процесу.

Також визначено, що вхідний сигнал ОР (положення виконавчого механізму) змінюється в діапазоні від -500 до 500 % і постійно зростає. Було введено обмеження для зміни сигналу на вході ОР (0...100%) та виконано моделювання (крок 2). На основі змодельованого перехідного процесу (крок 2) встановлено, що САР є стійкою і перехідний процес триває 2068 с (при заданій точності регулювання $\pm 0,5 \text{ °С}$), перша амплітуда (A_1) становить 13,7 °С, перерегулювання (φ) – 0 %.

Введення обмеження вхідного сигналу ОР забезпечує стійкість САР, проте крім цього обмеження необхідно також забезпечити зупинку виконавчого механізму при досягненні крайніх положень, оскільки спрацьовують кінцеві

вимикачі. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ (крок 3), встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичним, час регулювання дорівнює 889 с.

В автоматичних регуляторах передбачають наявність вхідних дискретних сигналів (від кінцевих вимикачів), котрі припиняють подачу імпульсів на виході регулятора у тих випадках, коли виконавчий механізм знаходиться у крайньому положенні. Крім цього існує конфігурація даної схеми імпульсного регулятора, коли сам виконавчий механізм знаходиться у зворотному зв'язку до трипозиційного реле. При цьому на регулятор поступає аналоговий сигнал положення ВМ. Перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ (крок 4) змодельовано для схеми з інтегратором у від'ємному зворотному зв'язку до трипозиційного реле, а також з ВМ у зворотному від'ємному зв'язку до трипозиційного реле (замість інтегратора). У двох варіантах було отримано однакові результати моделювання, з яких встановлено, що перехідний процес триває 2069 с, перша амплітуда (A_1) становить 13,7 °С, перерегулювання (φ) – 0 %.

Погіршення якості перехідного процесу пояснюється тим, що при досягненні крайнього положення виконавчого механізму припиняються імпульси на виході регулятора, а також зупиняється інтегратор у зворотному зв'язку до трипозиційного реле, але інтегральна складова аналогового ПД-регулятора продовжує змінюватись, що приводить до збільшення вхідного сигналу трипозиційного реле і відповідно до погіршення якості перехідного процесу. Для усунення цього небажаного ефекту необхідно ввести обмеження вихідного сигналу аналогового ПД-регулятора (0...100 %) та зупинити дію інтегральної складової ПІ закону регулювання при досягненні крайніх значень вихідного сигналу аналогового регулятора. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ, введеним обмеженням вихідного сигналу аналогового ПД-регулятора (0...100 %) та зупинкою інтегральної складової ПІ закону регулювання при досягненні крайніх значень вихідного сигналу

аналогового регулятора (крок 5), було встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичним, час регулювання дорівнює 822 с. Крім цього у стані рівноваги у САР спостерігається автоколивний перехідний процес із невеликою амплітудою, що зумовлене наявністю трипозиційного реле у складі автоматичного регулятора. Тривалість імпульсів “більше”/“менше” під час автоколивань становить 0,3 с, що відповідає заданій мінімальній тривалості імпульсу.

Для усунення автоколивань, на вході імпульсного регулятора встановлюють нелінійний елемент “зона нечутливості” ($\Delta_{НЧ1}$). Змодельовавши перехідний процес із “зоною нечутливості” на вході регулятора було встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичний і час регулювання дорівнює 972 с. Статична похибка регулювання в стані рівноваги є незначна (+0,01 °С).

Структурна схема САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ, введеним обмеженням вихідного сигналу аналогового ПІД-регулятора (0...100 %), зупинкою інтегральної складової ПІ закону регулювання при досягненні крайніх значень вихідного сигналу аналогового регулятора та із введеною зоною нечутливості на вході регулятора $\Delta_{НЧ1} = 0,5$ °С (від -0,25 до +0,25 °С) у середовищі SIMULINK представлена на рис.5.14.

Якісні показники змодельованих перехідних процесів для різних варіантів САР на базі аналогового ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем представлені у таблиці 5.4.

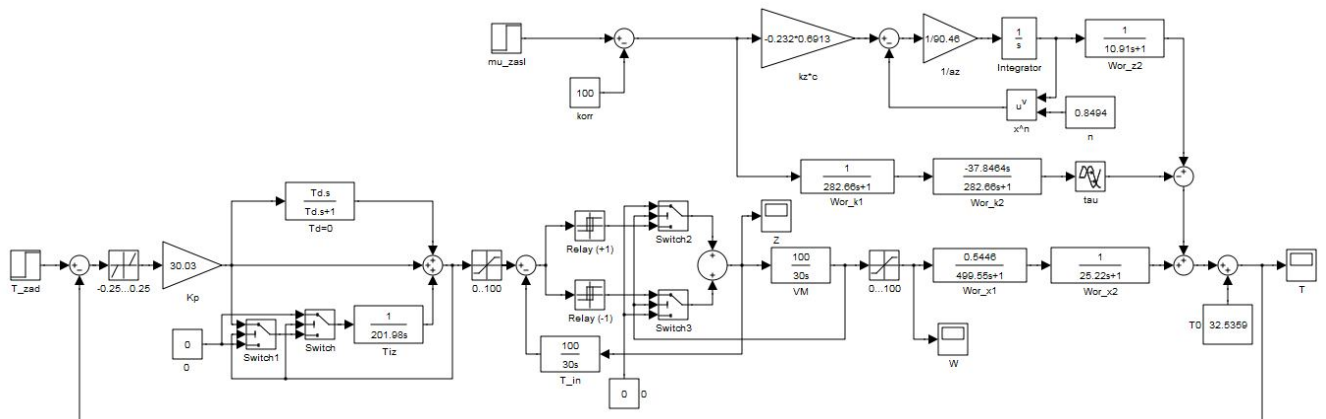


Рис.5.14. Структурна схема САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем в середовищі SIMULINK.

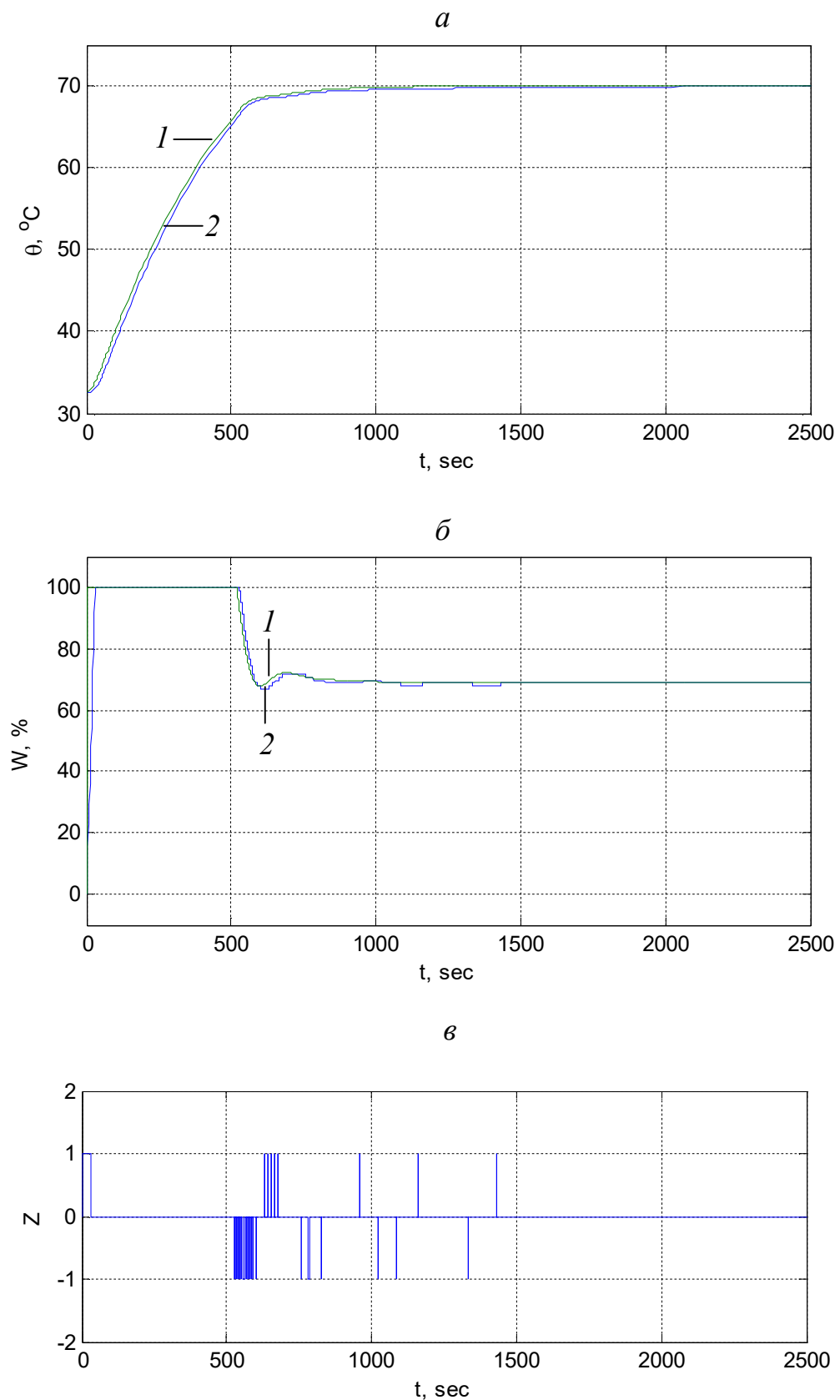


Рис. 5.15. Порівняння перехідних процесів для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

Отже, змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес для збурення шляхом зміни витрати повітря через піч. Збурення нанесено на 2500-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

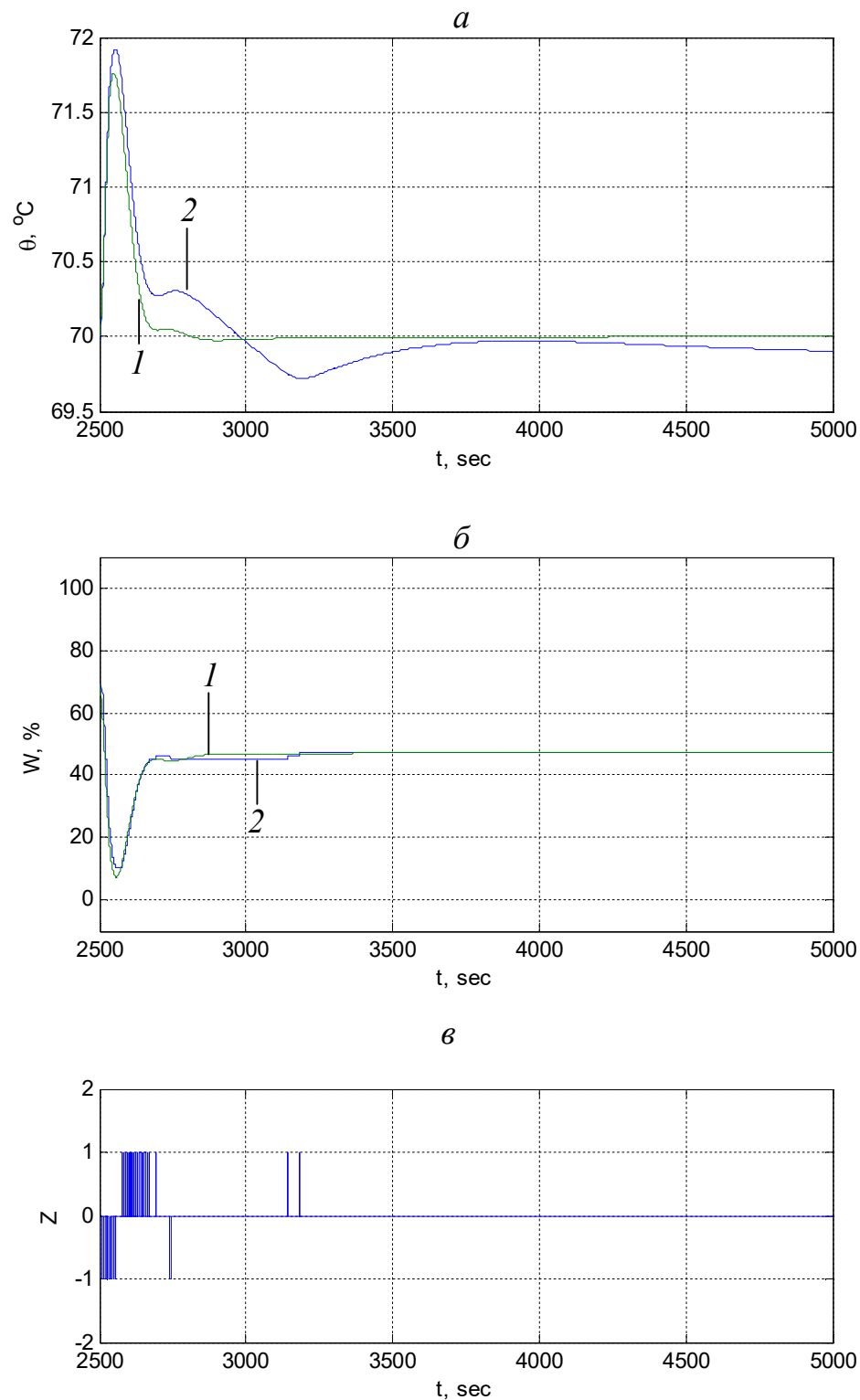


Рис. 5.16. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

Таблиця 5.4

Якісні показники перехідних процесів для САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем (ПІ закон регулювання)

№ кроку	Варіант САР	T_p , с	A_1	φ , %
1	САР без обмежень	-	47,9	145
2	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР	2068	13,7	0
3	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ	889	0	0
4	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході регулятора	2069	13,7	0
5	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою інтегральної складової аналогового ПІД-регулятора	822	0	0
6	САР із зоною нечутливості на вході регулятора	972	0	0

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем представлено на рис.5.15.

Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.16 *a*, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,2537 °С.

На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес триває 142 с, перша амплітуда (A_1) становить 2 °С, перерегулювання (φ) – 0 %. Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем представлено на рис.5.16.

Для перехідного процесу зображеного на рис.5.16 *a* середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,0184 °С.

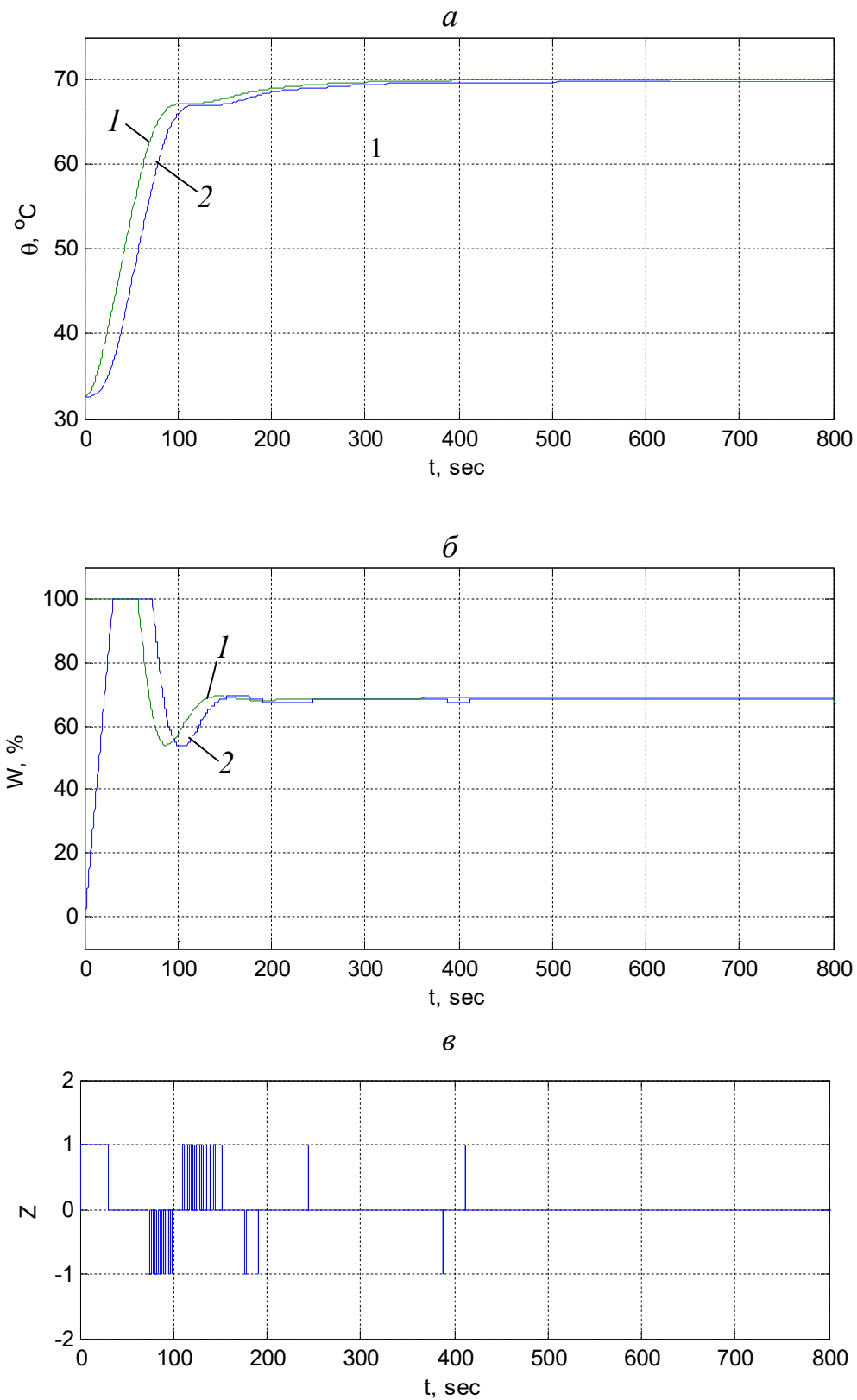


Рис. 5.17. Порівняння перехідних процесів при збуренні завданням регулятора для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем(2):

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

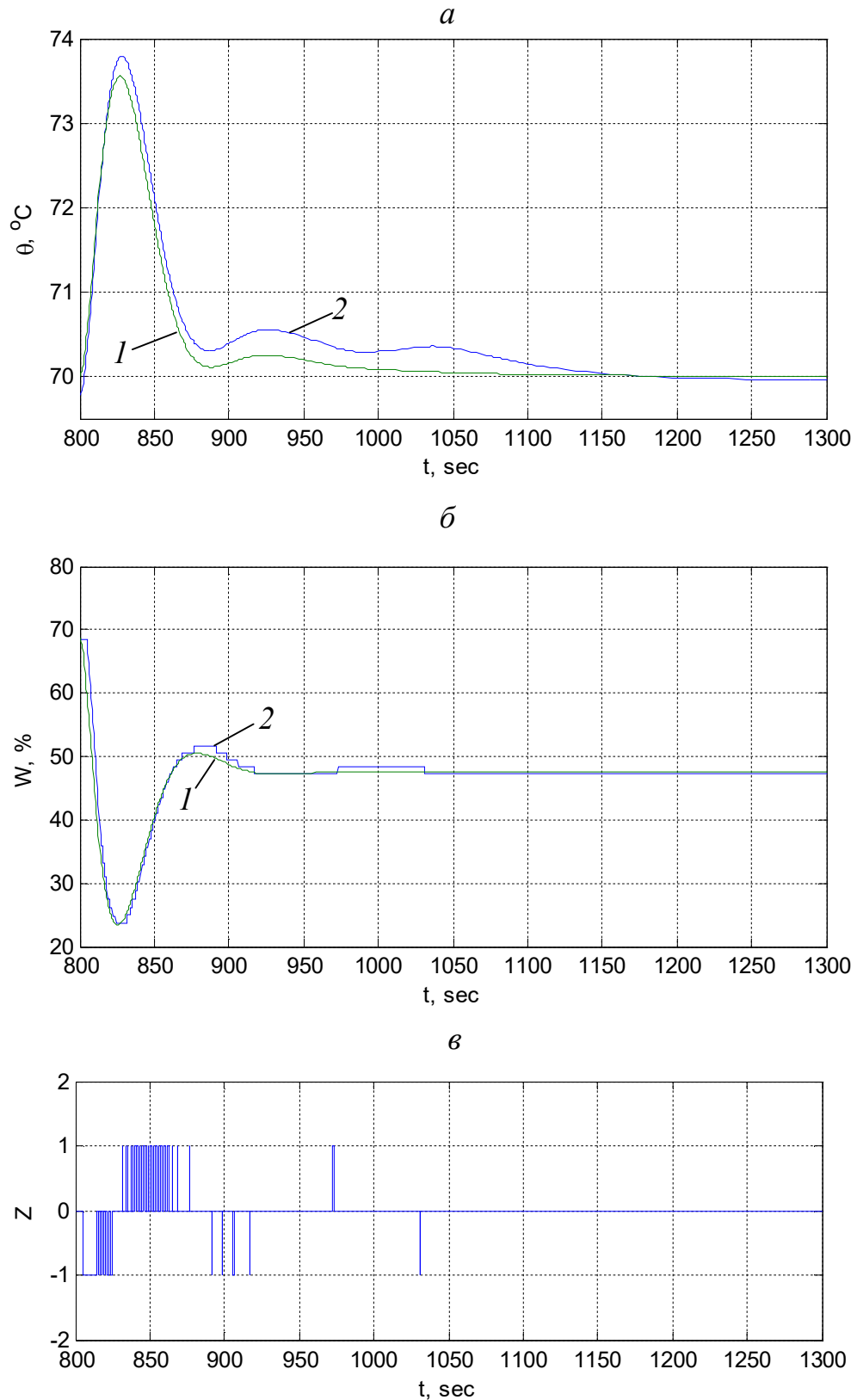


Рис. 5.18. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем (2):

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

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем (у режимі ПД закону регулювання), виконано розрахунок параметрів схеми регулятора для налаштувань згідно скоректованої моделі ОР. Ширина зони неоднозначності трипозиційного реле, розрахована за формулою (1.9) для мінімальної тривалості імпульсу 0,3 с та мінімальної стрибкоподібної зміни розузгодження 0,25 °С, становить 0,9906 °С. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,9906$ °С, $\Delta_{HЧ}=2 \cdot \Delta_{HO}$.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем представлено на рис.5.17. Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.17 а, середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 6,4819 °С, а час регулювання для імпульсного регулятора становить 319 с.

Змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес при збуренні каналом збурення. Збурення нанесено на 800-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем представлено на рис.5.18. На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес для імпульсного регулятора триває 143 с, а середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,0365 °С.

5.1.5. САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів, виконано розрахунок параметрів схеми регулятора. Ширина зони неоднозначності розрахована за тою ж формулою, що і

для схеми аналогового ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем і становить 0,9888 %. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{HO}=0,9888 \%$, $\Delta_{HC}=2 \cdot \Delta_{HO}$.

На основі змодельованого перехідного процесу у САР без обмежень (крок 1) при збуренні зміною завдання регулятору до 70 °С (від 32,5259°С) встановлено, що перехідний процес триває 1107 с при заданій допустимій похибці регулювання ($\pm 0,5$ °С), перша амплітуда (A_1) становить 15,4 °С, перерегулювання (φ) – 142 %.

Також визначено, що вхідний сигнал ОР (положення виконавчого механізму) змінюється в діапазоні від -300 до 450 %. Було введено обмеження для зміни сигналів на вході ОР (0...100%) та виконано моделювання (крок 2). На основі змодельованого перехідного процесу (крок 2) встановлено, що перехідний процес триває 1519 с, перша амплітуда (A_1) становить 8,5 °С, перерегулювання (φ) – 0 %.

Крім обмеження вхідного сигналу ОР необхідно також забезпечити зупинку виконавчого механізму (ВМ) при досягненні крайніх положень, оскільки спрацьовують кінцеві вимикачі. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР та зупинкою ВМ (крок 3), встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичний і триває 925 с.

В автоматичних регуляторах передбачають наявність вхідних дискретних сигналів (від кінцевих вимикачів), котрі припиняють подачу імпульсів на виході регулятора у тих випадках, коли виконавчий механізм знаходиться у крайньому положенні. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ (крок 4), встановлено, що перехідний процес триває 2002 с, перша амплітуда (A_1) становить 13,1 °С, перерегулювання (φ) – 0 %.

Погіршення якості перехідного процесу пояснюється тим, що при досягненні крайнього положення виконавчого механізму припиняються імпульси на виході регулятора, але при цьому інтегральна складова ПІ-регулятора продовжує змінюватись, що приводить до збільшення вхідного сигналу трипозиційного реле і відповідно до погіршення якості перехідного процесу. При досягненні крайнього положення виконавчого механізму необхідно не лише припинити подачу імпульсів на виході регулятора, а й зупинити дію інтегральної складової ПІ закону регулювання. Змодельовавши перехідний процес із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ та зупинкою інтегральної складової ПІ-регулятора (крок 5), встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичний, час регулювання становить 826 с. Крім цього у САР в стані рівноваги спостерігається автоколивний перехідний процес, що зумовлений наявністю трипозиційного реле у складі регулятора. Тривалість імпульсів “більше”/“менше” під час автоколивань становить 0,3 с, що відповідає заданій мінімальній тривалості імпульсу. Для усунення автоколивань, на вході імпульсного регулятора встановлюють нелінійний елемент “зона нечутливості” ($\Delta_{НЧІ}$). Змодельовавши перехідний процес із “зоною нечутливості” на вході регулятора було встановлено, що перехідний процес є гранично аперіодичним і час регулювання становить 973 с. Статична похибка регулювання в стані рівноваги становить 0,13 °С.

Структурна схема САР із обмеженням вхідного сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході АР в крайніх положеннях ВМ, зупинкою інтегральної складової ПІ-регулятора та із введеною зоною нечутливості на вході регулятора $\Delta_{НЧІ} = 0,5$ °С (від -0,25 до +0,25 °С) у середовищі SIMULINK представлена на рис.5.19. У схемі на рис.5.19 наведено схемне рішення для забезпечення можливості реалізації ПІД закону регулювання на базі імпульсного ПІ-регулятора.

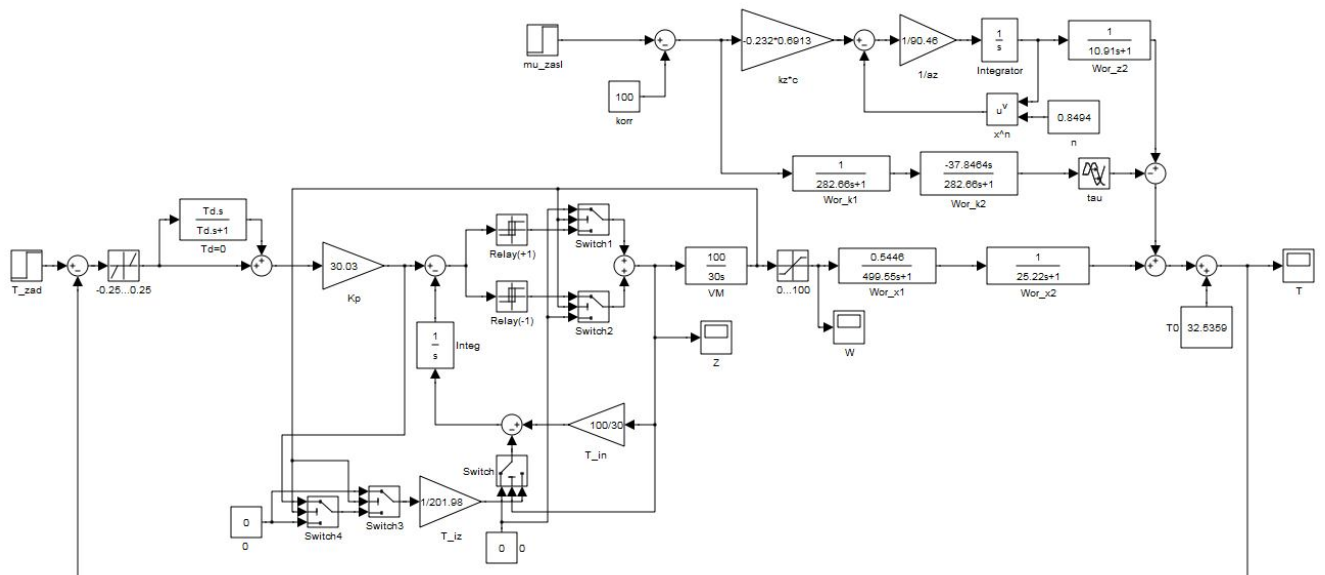


Рис.5.19. Структурна схема САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів в середовищі SIMULINK.

Якісні показники змодельованих перехідних процесів для різних варіантів САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів представлені у таблиці 5.5.

Таблиця 5.5

Якісні показники перехідних процесів для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів (ПІ закон регулювання)

№ кроку	Варіант САР	T_p , с	A_1	φ , %
1	САР без обмежень	1107	15,4	142
2	САР із обмеженням вхідного сигналу ОР	1519	8,5	0
3	САР із обмеженням вх. сигналу ОР та зупинкою ВМ	925	0	0
4	САР із обмеженням вх. сигналу ОР, зупинкою ВМ та припиненням подачі імпульсів на виході регулятора (крок 4)	2002	13,1	0
5	САР із обмеженням вх. сигналу ОР, зупинкою ВМ, припиненням подачі імпульсів на виході регулятора та зупинкою інтеграторів (крок 5)	826	0	0
6	САР із зоною нечутливості на вході регулятора (крок 6)	973	0	0

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів представлено на рис.5.20.

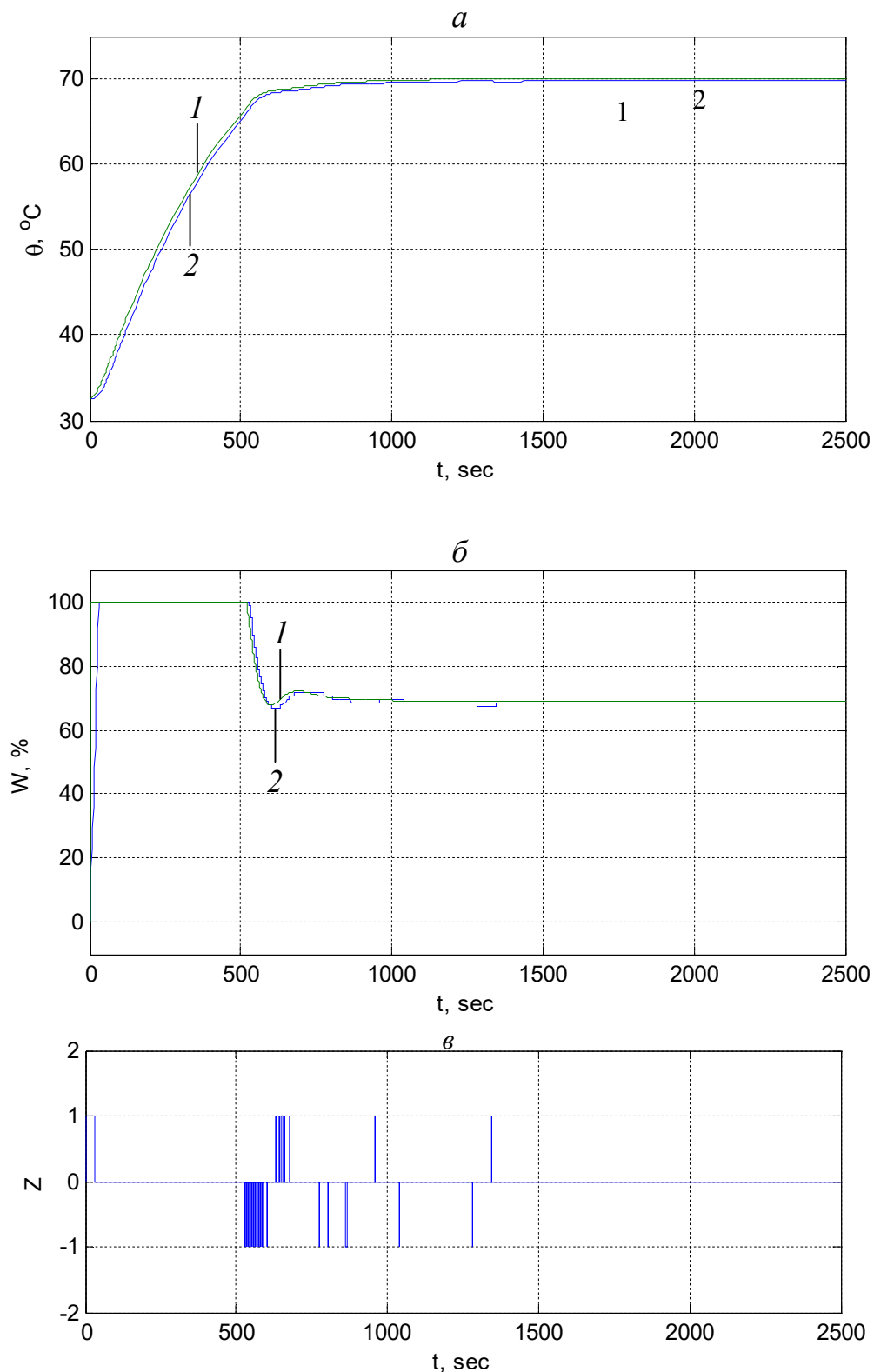


Рис. 5.20. Порівняння перехідних процесів для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів (2):
a) вихідний сигнал ОР; *б*) вхідний сигнал ОР; *в*) імпульси на виході регулятора.

Для перехідного процесу зображеного на рис.5.20 *a* середньоквадратичне відхилення становить $0,2628\text{ }^{\circ}\text{C}$.

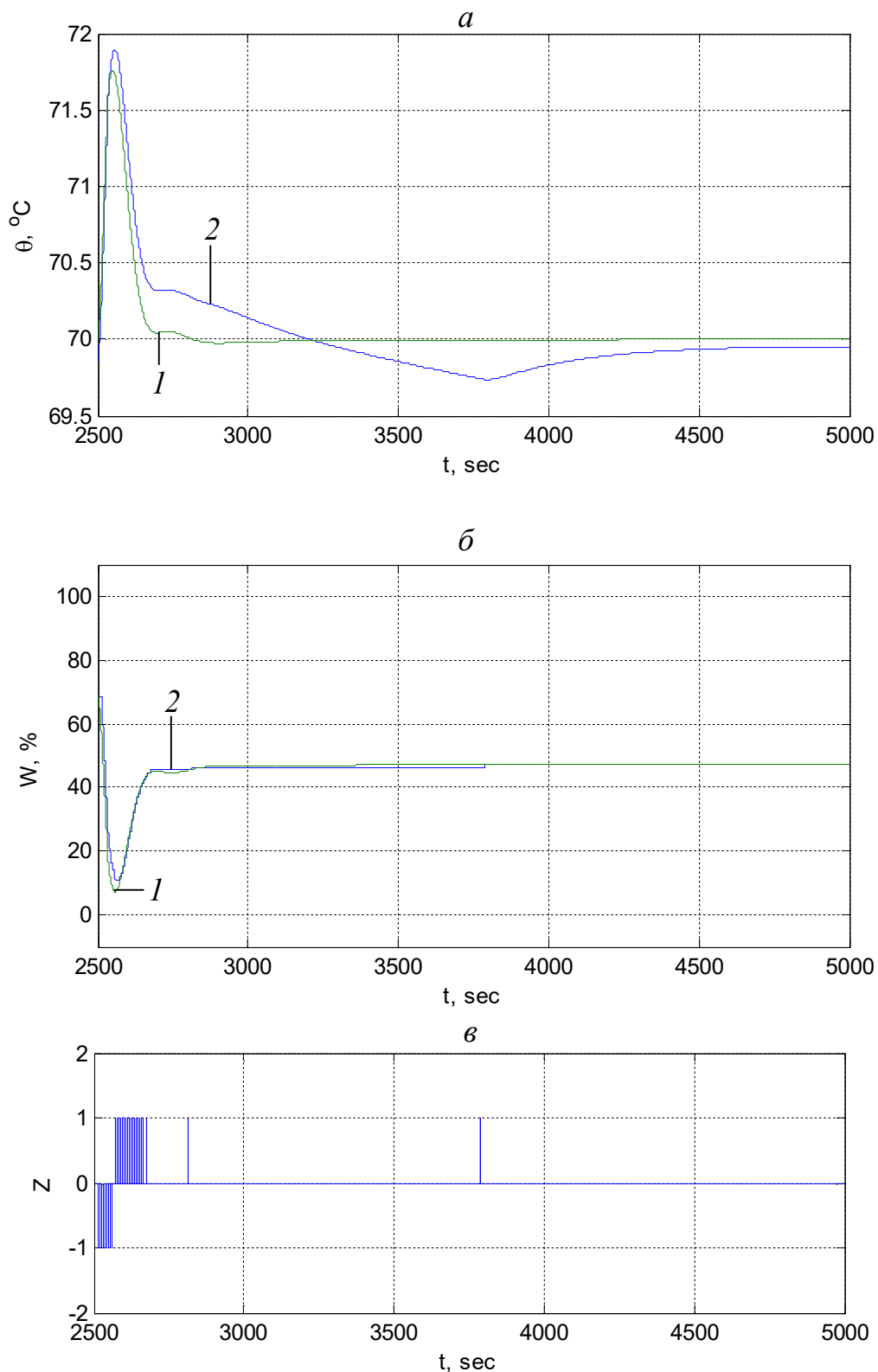


Рис. 5.21. Порівняння перехідних процесів по каналу збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів(2):

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

Отже, змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес для збурення шляхом зміни витрати повітря через піч. Збурення нанесено на 2500-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес триває 147 с, перша амплітуда (A_1) становить 2 °С, перерегулювання (φ) – 0 %. Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів представлено на рис.5.21. Для перехідного процесу зображеного на рис.5.21 *a* середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,0256 °С.

Для моделювання перехідних процесів у замкнутій САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів (зі схемним рішенням для забезпечення можливості реалізації ПІД закону регулювання на базі імпульсного ПІ-регулятора), виконано розрахунок параметрів схеми регулятора для налаштувань згідно скоректованої моделі ОР. Ширина зони неоднозначності трипозиційного реле, розрахована за тою ж формулою, що і для схеми ПІД-регулятора з імпульсним перетворювачем (схема 3.3) і становить 0,9906 °С. Час повного переміщення виконавчого механізму становить 30 с. Налаштування трипозиційного реле у складі імпульсного регулятора: $\Delta_{НО}=0,9906$ °С, $\Delta_{НЧ}=2 \cdot \Delta_{НО}$.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів представлено на рис.5.22. Для перехідного процесу, зображеного на рис.5.22 *a*, середньо-квадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 13,1134 °С, а час регулювання для імпульсного регулятора становить 375 с.

Змодельовано вихід об'єкта на номінальний режим. Також було змодельовано перехідний процес при збуренні каналом збурення. Збурення нанесено на 800-ій секунді зміною положення заслінки на 50 %.

Порівняння перехідного процесу для САР з аналоговим регулятором та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів представлено на рис.5.23. На основі виконаного моделювання для збурення каналом збурення встановлено, що перехідний процес для імпульсного регулятора триває 156 с, а середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ становить 0,0792 °С.

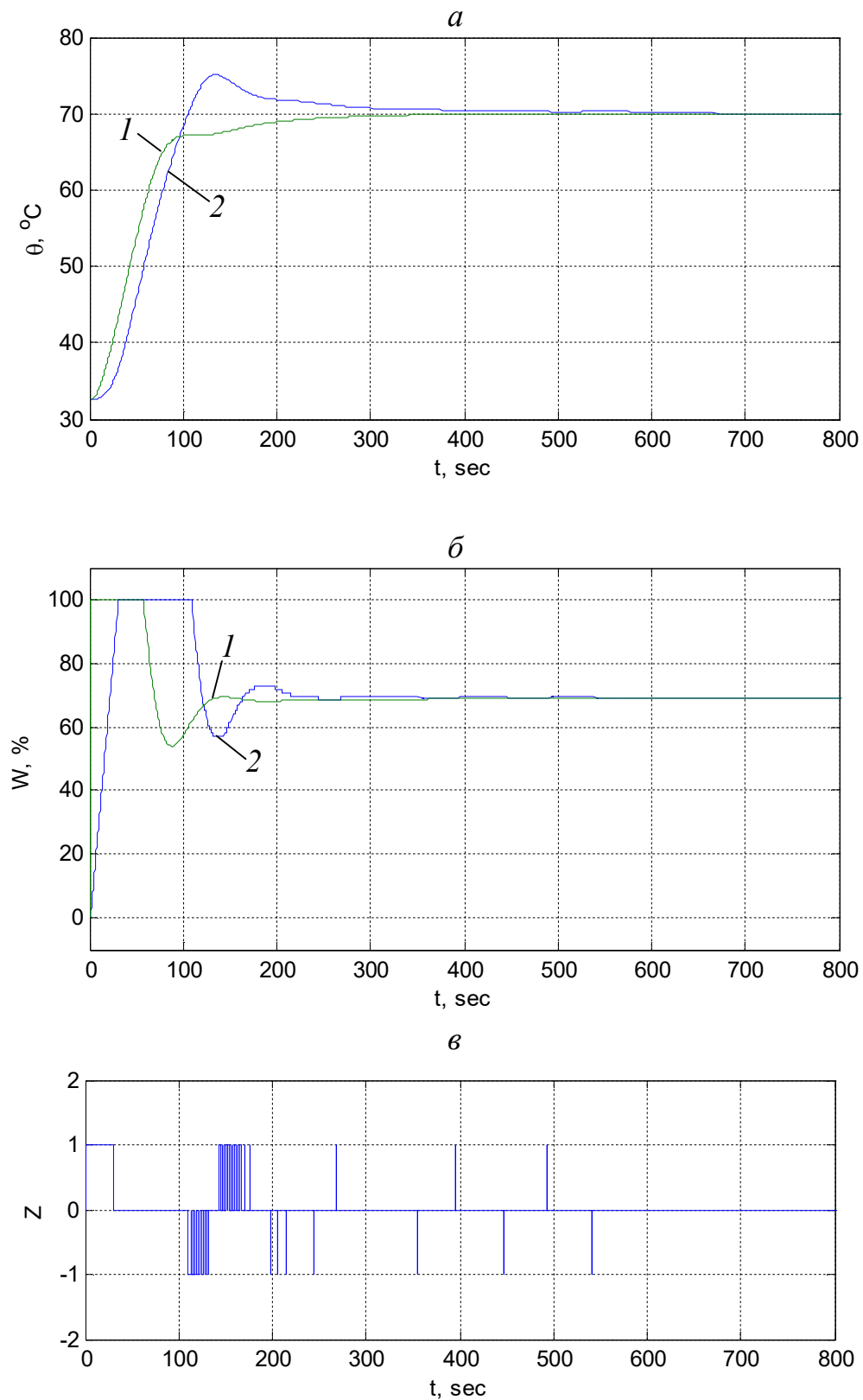


Рис. 5.22. Порівняння перехідних процесів при збуренні завданням регулятора для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів (2):

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

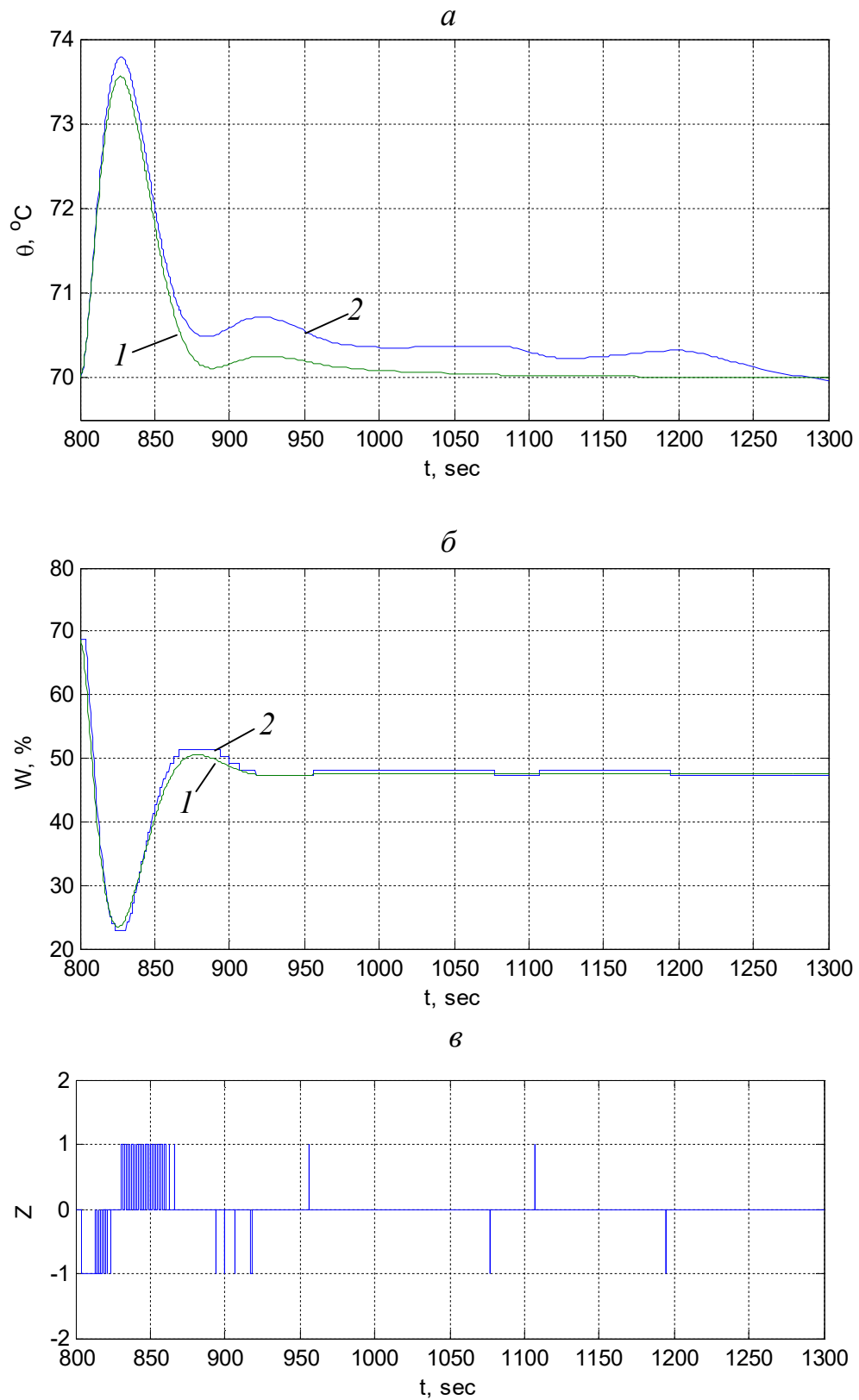


Рис. 5.23. Порівняння перехідних процесів при збуренні каналом збурення для САР з аналоговим регулятором (1) та для САР на базі ПІ-регулятора з генератором імпульсів (2):

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

Показники якості перехідних процесів у САР з різними схемами імпульсних регуляторів представлені табл. 5.6 (ПІ закон регулювання) та 5.7 (ПД закон регулювання).

Таблиця 5.6

Якісні показники перехідних процесів у САР з різними схемами імпульсних регуляторів (ПІ закон регулювання)

Назва схеми	Зміна завдання регулятора		Збурення витратою повітря	
	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c
Імп. ПД-регулятор з подвійним диференц.	0,2512	934	0,0309	146
ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ	0,2654	967	0,0301	146
ПД-регулятор з імп. перетворювачем	0,2537	972	0,0184	142
ПІ-регулятор з генератором імпульсів	0,2628	973	0,0256	147

З отриманих результатів видно, що при збуренні зміною завдання регулятора найкращу якість перехідного процесу забезпечує схема з подвійним диференціюванням, оскільки час регулювання та середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ для цієї схеми є найменшими, порівняно з іншими схемами.

При збуренні витратою повітря найкращу якість перехідного процесу забезпечує схема з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем.

Оскільки розрахунок параметрів налаштування автоматичного регулятора виконано для збурення витратою повітря, то схему з найкращими показниками для цього збурення слід вважати найкращою. Тому, на основі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, що найкращу якість перехідних процесів у замкнутій САР забезпечує схема з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем (схема 3.3 згідно розробленої класифікації).

Таблиця 5.7

Якісні показники перехідних процесів у САР з різними схемами імпульсних регуляторів (ПД закон регулювання)

Назва схеми	Зміна завдання регулятора		Збурення каналом збурення	
	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c	$\sigma_{САР}, \%$	T_p, c
Імп. ПД-регулятор з подвійним диференц.	7,6133	149	0,0598	157
ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ	6,4802	320	0,0480	145
ПД-регулятор з імп. перетворювачем	6,4819	319	0,0365	143
ПІ-регулятор з генератором імпульсів	13,1134	375	0,0792	156

З отриманих результатів видно, що найкращу якість перехідних процесів забезпечують такі дві схеми: схема з аналоговим регулятором та імпульсним перетворювачем та схема з аналоговим регулятором та широтно-імпульсним модулятором, оскільки час регулювання та середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ для цих схем є меншими, порівняно з іншими схемами.

У схемі на базі імпульсного ПД-регулятора з подвійним диференціюванням при збуренні завданням регулятора час регулювання є найкоротшим, проте середньоквадратичне відхилення $\sigma_{САР}$ є більшим, ніж у наступних двох схемах.

При збуренні каналом збурення найменше значення середньоквадратичного відхилення $\sigma_{САР}$ та найменший час регулювання забезпечує схема з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем.

Оскільки розрахунок параметрів налаштування автоматичного регулятора виконано для збурення каналом збурення, то схему з найкращими показниками для цього збурення слід вважати найкращою. Тому, на основі отриманих результатів моделювання можна зробити висновок, що найкращу якість перехідних процесів у замкнутій САР на базі скоректованої моделі забезпечує схема з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем (схема 3.3 згідно розробленої класифікації).

5.2. Моделювання та аналіз перехідних процесів у системі автоматичного регулювання завантаженості кульового барабанного млина

Моделювання перехідного процесу в системі автоматичного регулювання виконано для КБМ типу Ш-50А, керування яким здійснюється за допомогою ПІ-регулятора з оптимальними параметрами налаштування (див. підрозділ 4.2.3). Перехідний процес отримано для збурення зміною завдання регулятора на 5 °С. Структурна схема системи автоматичного регулювання в середовищі Simulink програмного пакету Matlab показана на рис.5.24.

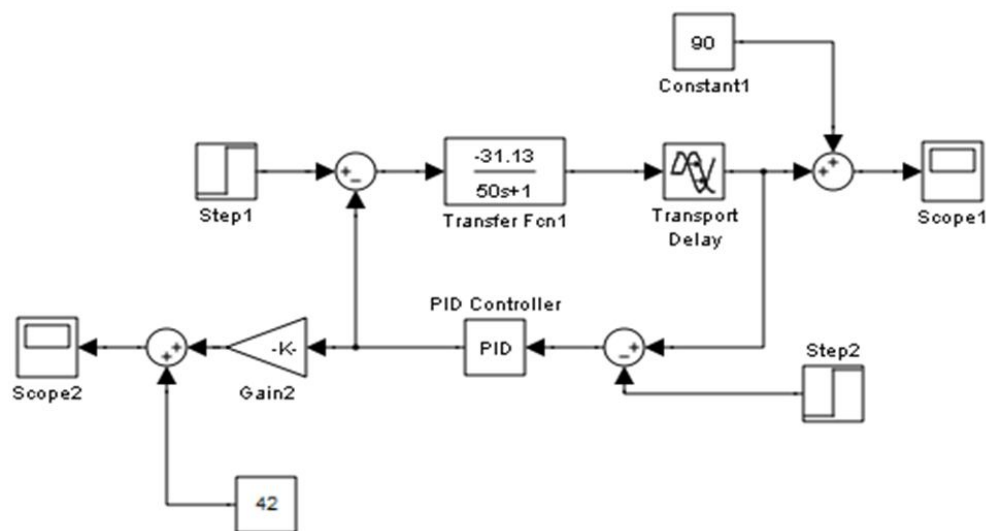


Рис.5.24. Структурна схема для моделювання САР КБМ.

У результаті моделювання отримано перехідні процеси, представлені на рис.5.25, рис.5.26.

Характеристики перехідного процесу:

- максимальне динамічне відхилення $A_1=2,18^\circ\text{C}$;
- час регулювання $t_p=129$ с при точності регулювання $\Delta=\pm 0,5^\circ\text{C}$;
- *перерегулювання* регульованої величини $\varphi=0,78/2,18*100= 35,78\%$;
- ступінь згасання $\psi=(2,18-0,31)/2,18=0,86$;
- *час першого узгодження* перехідного процесу $t_{пс}=42,3$ с;
- час досягнення першого максимуму $t_{\max}=63$ с.

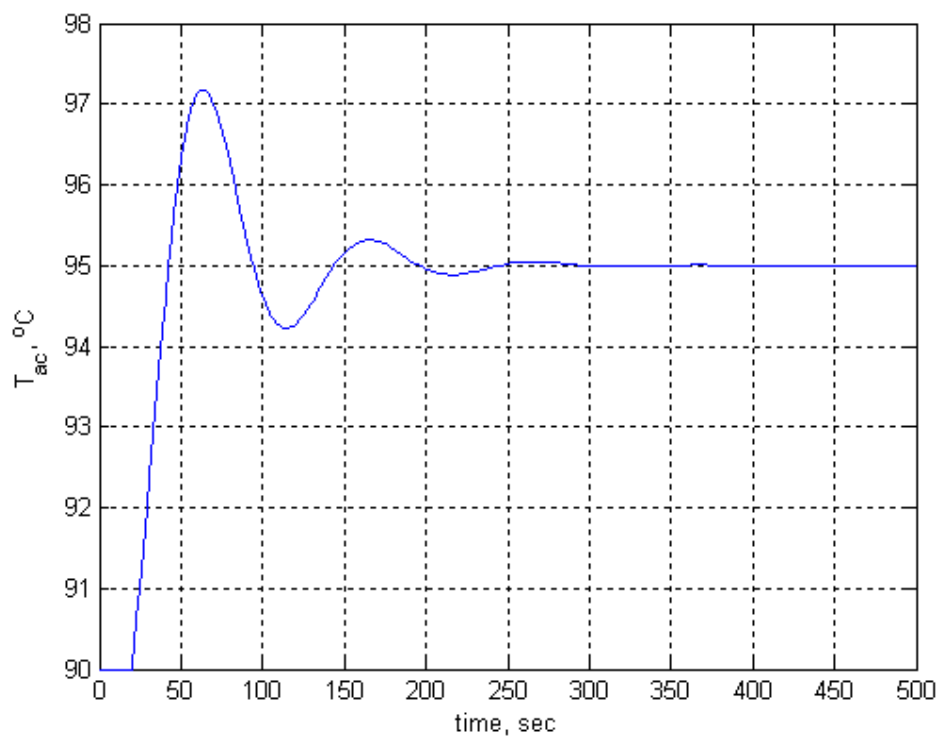


Рис.5.25. Перехідний процес при оптимальних параметрах ПІ-регулятора.

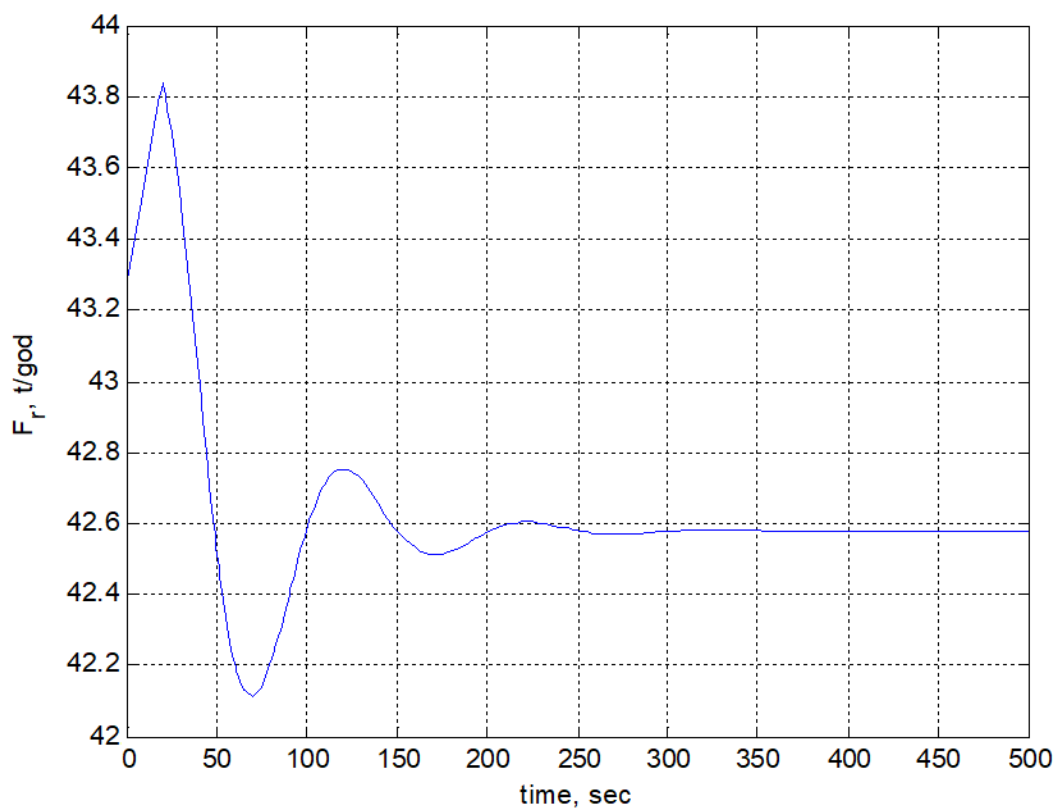


Рис.5.26. Розмелювальна продуктивність млина при неперервній подачі сирого вугілля.

Для моделювання САР КБМ з імпульсною подачею сирого вугілля застосовано структурну схему, показану на рис.5.27. Отриманий перехідний процес показаний на рис.5.28.

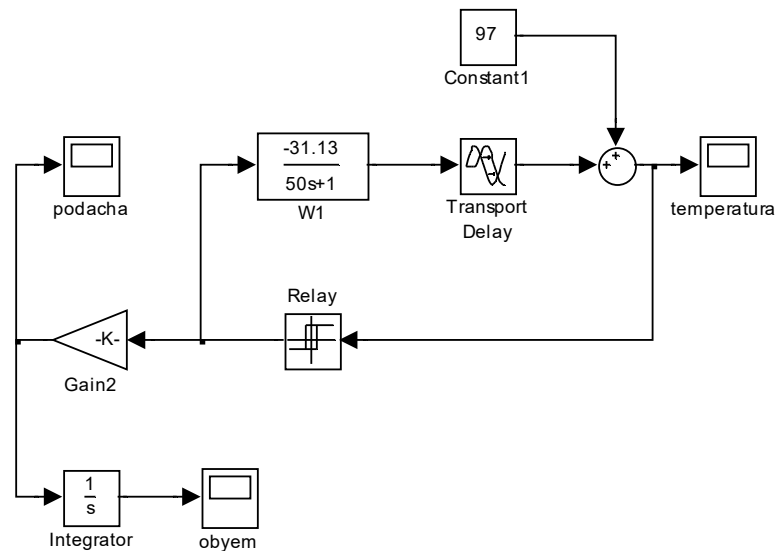


Рис.5.27. Структурна схема для моделювання САР КБМ з імпульсною подачею сирого вугілля за температурою аеросуміші.

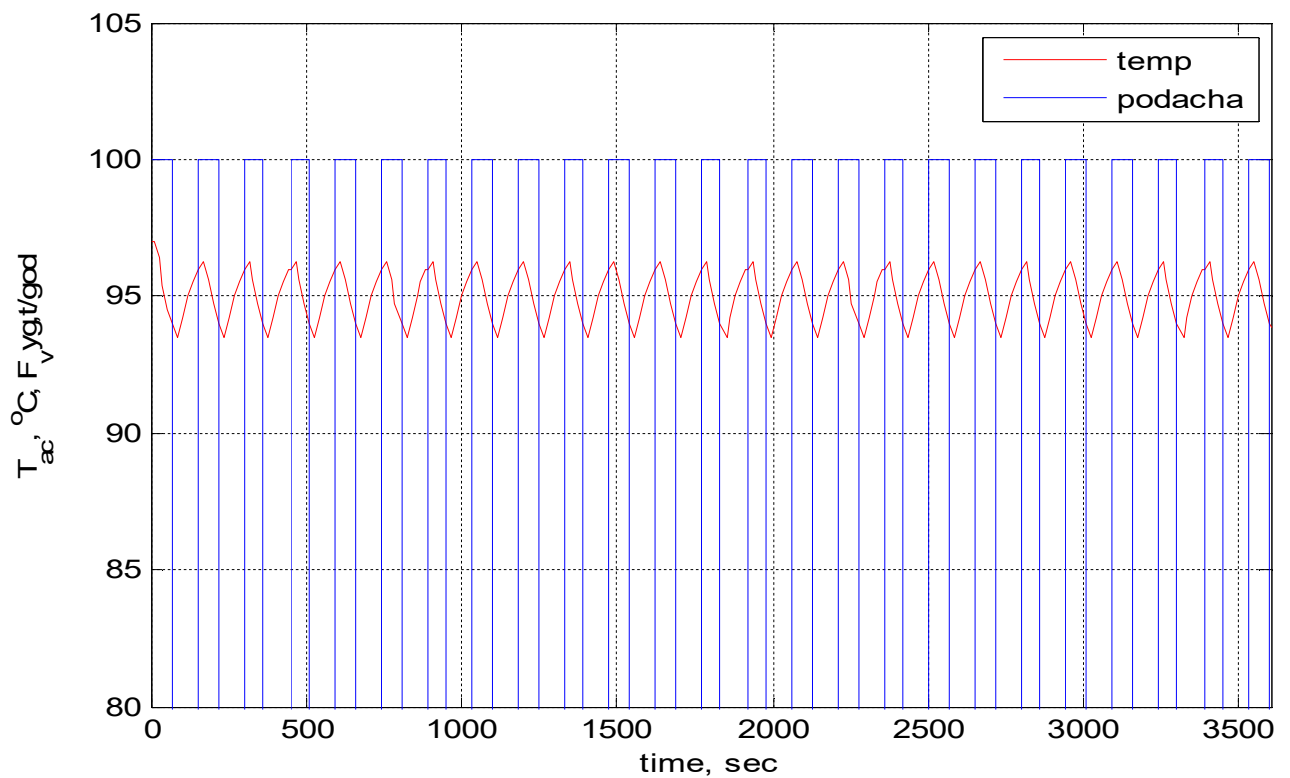


Рис.5.28. Графік перехідного процесу САР температури аеросуміші з імпульсною подачею сирого вугілля.

Проінтегрувавши подачу сирого вугілля у системі з імпульсною подачею вугілля (рис.5.28), отримано середню розмелювальну продуктивність 48,8 т/год для млина типу Ш-50А. Для системи з неперервною подачею вугілля (рис.5.26) розмелювальна продуктивність млина типу Ш-50А становить 42,58 т/год.

На основі моделювання встановлено, що при імпульсній подачі сирого вугілля розмелювальна продуктивність млина є на 12 % 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.

Регулятор працює в різних режимах в залежності від значень температури аеросуміші, перепаду тиску на барабані млина, а також ступеня завантаженості млина. На вибір режиму впливають також характеристики вугілля і пилесистеми.

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

При наявності обмежень по сушильній чи вентиляційній можливостях млина, а також при виникненні передаварійних ситуацій регулятор переходить в інші режими роботи. При пониженні температури нижче мінімально допустимого значення незалежно від ступеня завантаженості млина чи перепаду тиску на барабані млина регулятор закриває подачу сирого вугілля в млин.

Заборона на подачу вугілля в млин також виникає при перевищенні значення перепаду тиску на барабані млина вище його максимально допустимого значення, тобто $\Delta P > \Delta P_{max}$, але тільки при умові, що значення температури аеросуміші на виході млина знаходиться в допустимих межах ($T_{min} < T < T_{max}$).

Мінімальне і максимальне значення температури аеросуміші на виході з млина, а також перепаду тиску на барабані млина (T_{min} , T_{max} , ΔP_{min} , ΔP_{max}) задаються для кожного типу млина і конкретної реалізації системи пилеприготування індивідуально.

5.3. Моделювання похибок автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах

Для моделювання похибки, зумовленої інерційністю термоперетворювача під час коливань температури газу, ΔT_{in} застосовано математичну модель у вигляді системи рівнянь (3.46). Моделювання виконано для вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника КВР-1 G-250 з параметрами, наведеними у табл.5.8. Цей вузол обліку встановлений у приміщенні котельні і на ньому має місце імпульсний режим протікання газу, що спричинене режимом споживання газу водогрійним котлом.

Математична модель системи обліку реалізована у вигляді структурної схеми в середовищі SIMULINK програмного пакету MATLAB і представлена на рис.5.33. На цій схемі імпульсний сигнал витрати газу в робочих умовах (блок Impulse F_o) поступає на блок MATLAB Function, а далі на Gain, і на виході інтегратора (Integrator1) отримується сигнал температури газу в місці монтажу термоперетворювача (T_{gaz2}). Блок W_TT1 реалізує функцію передачі термоперетворювача і на його виході маємо сигнал вимірної температури газу на виході термоперетворювача ($T_{в.газ}$). Цей сигнал поступає на блоки ro_r2, Product1 і Gain2 і таким чином отримується сигнал витрати газу, зведеної до стандартних умов за вимірним значенням температури газу.

Таблиця 5.8

Параметри вузла обліку природного газу

Назва параметра	Значення
Тип середовища	природний газ
Абсолютний тиск газу, кПа	380
Температура газу, °С	+19,04
Витрата, приведена до стандартних умов, м ³ /год	110,00
Температура повітря в приміщенні котельні, °С	+28
Внутрішній діаметр трубопроводу, мм	80

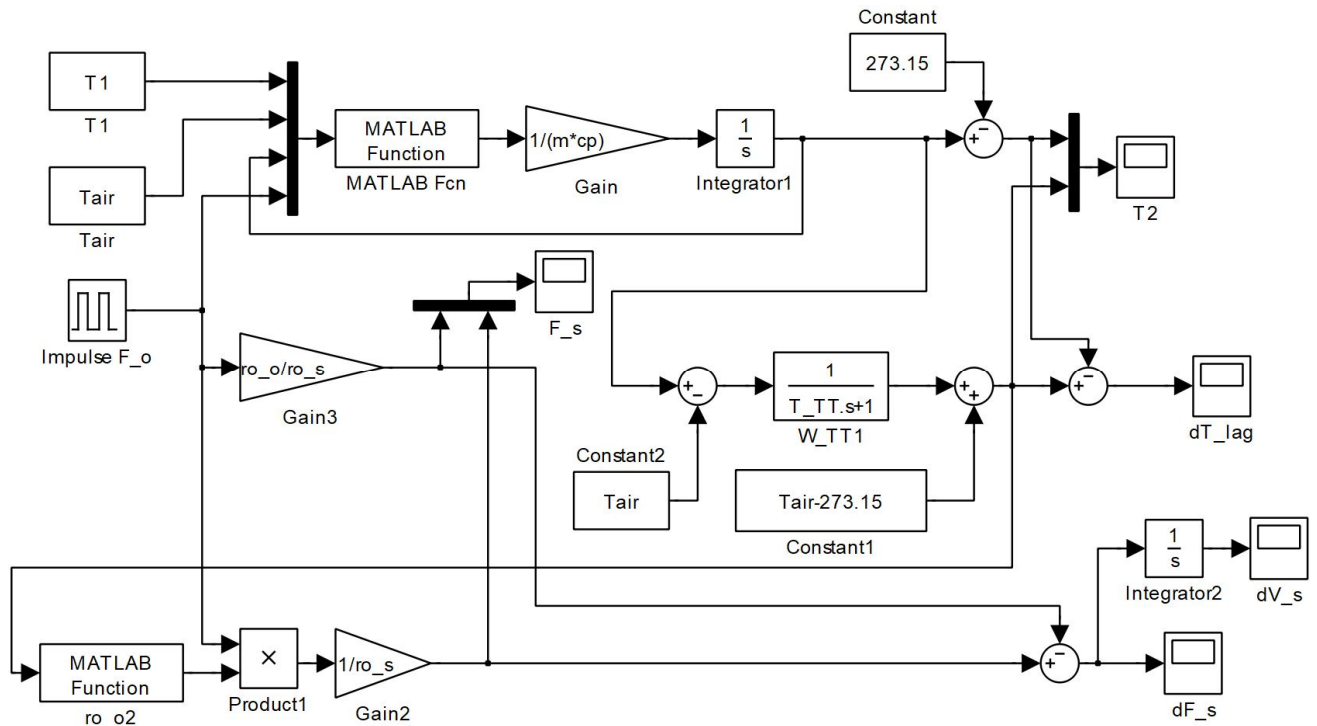


Рис.5.29. Структурна схема математичної моделі системи обліку природного газу в середовищі SIMULINK.

На схемі (рис.5.29) зроблено такі позначення змінних: T_1 – температура газу в місці входу трубопроводу в приміщення котельні; T_2 – температура газу в місці монтажу термоперетворювача; T_{air} – температура навколишнього повітря в приміщенні котельні; dT_{lag} – похибка вимірювання температури газу, зумовлена інерційністю термоперетворювача; dF_s – похибка вимірювання витрати газу, зумовлена похибкою dT_{lag} ; dV_s – похибка вимірювання об’єму газу, зумовлена похибкою dT_{lag} .

На вхід моделі поступає імпульсний сигнал зміни витрати газу. Тривалість імпульсів та пауз між ними становлять 15 хв. Стала часу термоперетворювача становить 1 хв. Результати моделювання зображені у вигляді графіків на рис.5.30,5.31.

З результатів моделювання (рис.5.31) видно, що при імпульсних режимах 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 ΔF_c та ΔV_c – від’ємними. Це означає, що на вузлі обліку газу має місце заниження виміряного об’єму спожитого газу.

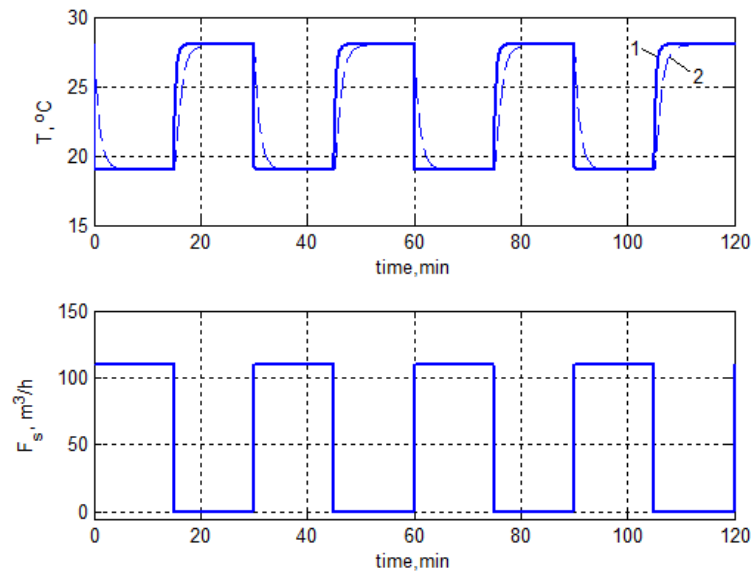


Рис.5.30. Зміна витрати та температури газу: 1 – дійсне значення температури газу; 2 – вимірне значення температури газу.

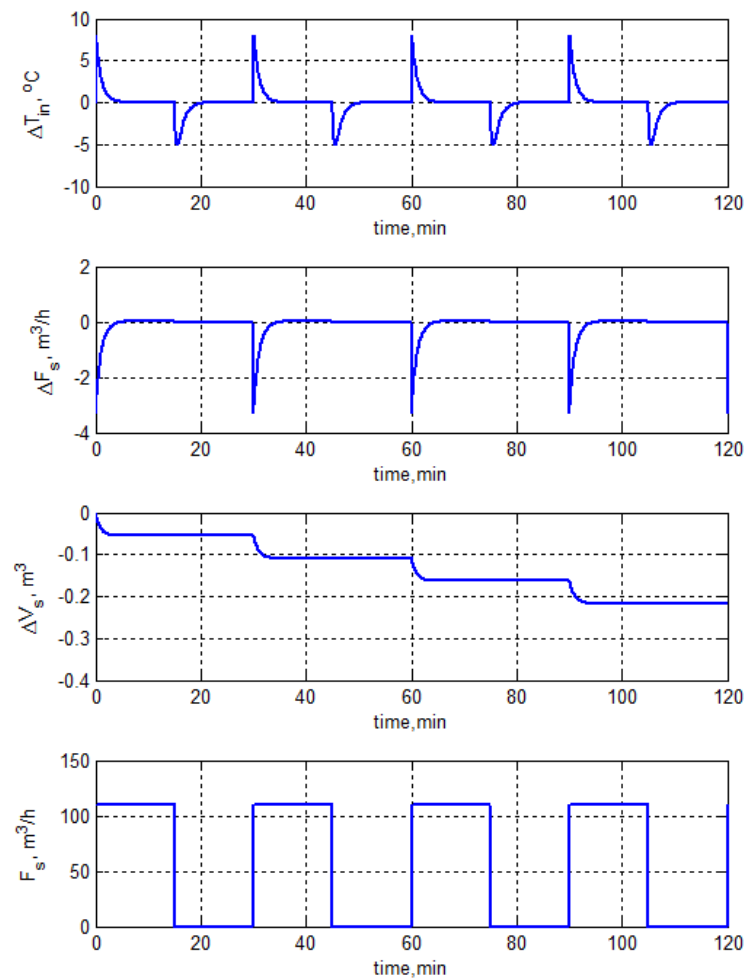


Рис.5.31. Зміна витрати газу та похибок ΔT_{in} , ΔF_c , та ΔV_c .

Для аналізованого вузла вимірне значення об'єму газу за 2 години є занижене на $0,22 \text{ м}^3$, а за добу – на $2,67 \text{ м}^3$. Моделювання було виконане і для інших режимів протікання газу. В тому випадку, коли період та тривалість імпульсів витрати газу буде не 15 хв, а 10 хв, заниження буде становити $4,10 \text{ м}^3$ на добу, а коли стала часу термоперетворювача буде не 1 хв, а 1,5 хв (при періоді та тривалості імпульсів витрати газу 15 хв) заниження буде становити $4,01 \text{ м}^3$ на добу. Коли тривалість імпульсів витрати газу буде 10 хв, а стала часу термоперетворювача буде рівна 1,5 хв заниження виміряного об'єму буде становити $6,09 \text{ м}^3$ на добу.

Застосування розробленої моделі дає можливість оцінити вплив імпульсних режимів протікання газу на точність його обліку. Виявлення та усунення додаткової похибки, зумовленої інерційністю термоперетворювача в імпульсному режимі протікання газу є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу.

Виконано моделювання похибки вимірювання температури газу, зумовленої теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу $\Delta T_{ЛГ}$, для діючого вузла обліку природного газу на базі роторного лічильника (див. підрозділ 3.3.3, табл.3.16), при різних значеннях витрати газу та різних температурних напорах (різницях температур потоку газу і навколишнього повітря).

Максимальна витрата газу в робочих умовах для лічильника GMS-G160 становить $q_{\max}=250 \text{ м}^3/\text{Год}$. Моделювання виконано для таких значень витрати: $0,2q_{\max}$, $0,4q_{\max}$, $0,6q_{\max}$, $0,8q_{\max}$, $1,0q_{\max}$. Приймемо, що температура потоку газу $T_{\text{газ}}=15 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура навколишнього повітря становить: $0 \text{ }^\circ\text{C}$, $+5 \text{ }^\circ\text{C}$, $+10 \text{ }^\circ\text{C}$, $+20 \text{ }^\circ\text{C}$, $+25 \text{ }^\circ\text{C}$, $+30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Результати моделювання представлені у табл.5.9 та на рис.5.32.

Значення похибки $\Delta T_{ЛГ}$ при різних значеннях витрати газу та температурних напорах

$(T_{нов} - T_{газ}),$ °C	Витрата газу				
	$0,2q_{max}$	$0,4q_{max}$	$0,6q_{max}$	$0,8q_{max}$	$1,0q_{max}$
-15	-3,6217	-2,0869	-1,4708	-1,1374	-0,9281
-10	-1,9035	-1,0891	-0,7657	-0,5913	-0,4820
-5	-0,6459	-0,3649	-0,2552	-0,1966	-0,16
+5	0,6579	0,3715	0,2598	0,2001	0,1628
+10	1,9595	1,1202	0,7872	0,6078	0,4954
+15	3,7514	2,1583	1,5201	1,1751	0,9586

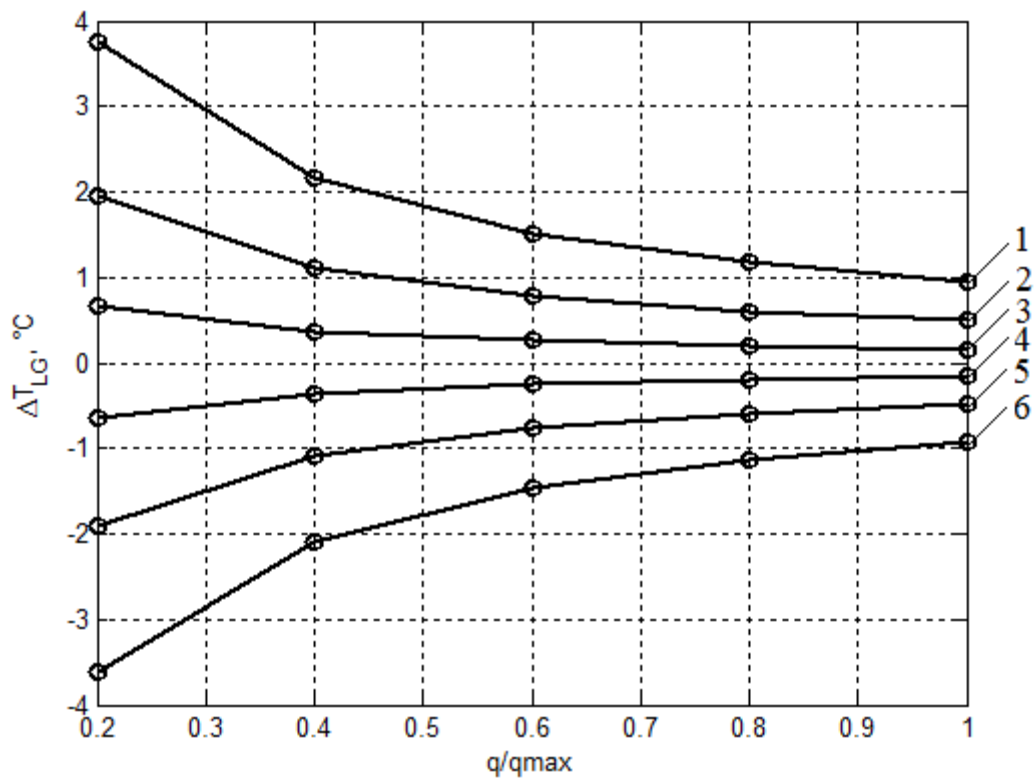


Рис. 5.32. Значення похибки $\Delta T_{ЛГ}$ при різних значеннях витрати газу та температурних напорах

(1 – $(T_{нов} - T_{газ}) = +15$ °C; 2 – $(T_{газ} - T_{нов}) = +10$ °C; 3 – $(T_{газ} - T_{нов}) = +5$ °C;
4 – $(T_{газ} - T_{нов}) = -5$ °C; 5 – $(T_{газ} - T_{нов}) = -10$ °C; 6 – $(T_{газ} - T_{нов}) = -15$ °C).

Із отриманих результатів моделювання видно, що при збільшенні витрати потоку газу похибка $\Delta T_{ЛГ}$ зменшується, що пояснюється зменшенням тривалості контакту потоку газу із корпусом лічильника. При збільшенні різниці температур потоку газу та навколишнього повітря абсолютна величина похибки $\Delta T_{ЛГ}$ збільшується, в наслідок того, що при збільшеному температурному напорі інтенсивність теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника є вища.

Застосування розробленої моделі дає можливість оцінити вплив теплообміну між потоком газу та корпусом лічильника газу на точність обліку. Виявлення та усунення додаткової похибки, зумовленої теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу.

5.4. Розробка заходів для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах

Для підвищення точності вимірювання витрати і кількості природного газу на теплогенеруючих об'єктах, де має місце значна різниця температур потоку газу та навколишнього повітря і відбуваються теплообмінні процеси, необхідно передбачити заходи щодо мінімізації та усунення додаткових похибок вимірювання температури потоку газу та відповідних похибок вимірювання витрати та об'єму газу.

Усунути додаткову похибку вимірювання об'єму природного газу, зумовлену впливом теплообмінних процесів у системі обліку, можна шляхом усунення усіх складових сумарної похибки вимірювання температури газу.

Похибку, зумовлену теплообміном між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу (ΔT_T), можна суттєво зменшити, або й усунути взагалі, за допомогою теплоізоляційної вставки між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу, а також встановивши теплоізоляцію на вимірювальній ділянці трубопроводу. Встановлення термоперетворювача без захисної гільзи з теплоізоляційною вставкою в трубопровід дозволить усунути теплообмін між термоперетворювачем та стінкою трубопроводу шляхом теплопровідності.

Для встановлення термоперетворювачів без захисної гільзи у трубопровід застосовують рухомі та нерухомі штуцера, розраховані на тиск до 0,4 МПа. При монтажу термоперетворювачів у трубопроводах з вищим тиском застосовують захисні гільзи, розраховані на тиск до 25 МПа.

При встановленні термоперетворювача із захисною гільзою, суттєво зменшити відхилення ΔT_T можна встановивши теплоізоляцію ділянки трубопроводу в місці встановлення термоперетворювача, що приведе до зменшення різниці температур термоперетворювача та стінки трубопроводу.

Похибка, зумовлена теплообміном стінки трубопроводу з навколишнім повітрям (ΔT_x), може бути усунена шляхом встановлення теплової ізоляції на вимірювальній ділянці трубопроводу. Це зменшить тепловий потік від газу до навколишнього повітря і, відповідно, зменшить зміну температури газу вздовж трубопроводу.

Похибку, зумовлену інерційністю термоперетворювача під час коливання температури потоку газу (ΔT_{in}), можна усунути 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.

Якщо на вимірювальній ділянці трубопроводу має місце імпульсний режим протікання газу, то мінімізувати похибку ΔT_{in} можна шляхом встановлення вузла обліку в умовах, де різниця температур потоку газу та навколишнього повітря є мінімальною (наприклад, в шафі на вулиці). Ще одним способом для зменшення похибки ΔT_{in} є встановлення теплоізоляції на ділянці трубопроводу перед вузлом обліку.

Промислові водогрійні котли та парогенератори часто споживають газ в імпульсному режимі. Тобто газ на пальник подається дискретно з певною фіксованою витратою. Частота імпульсів витрати газу, а також тривалість імпульсів та пауз між ними залежать від таких факторів:

- режим споживання тепла (гарячої води, пари, тощо), який впливає на навантаження котла. Зміна навантаження котла приводить до зміни частоти імпульсів витрати газу та тривалість імпульсів і пауз між ними.

- налаштування регулятора температури, а саме ширина зони неоднозначності двопозиційного регулятора температури визначає частоту спрацювання регулятора та впливає на параметри імпульсів витрати газу.

- витрата газу на пальник. Значення витрати газу на пальник встановлюється положенням регулюючого органу на лінії подачі газу. Чим більша витрата газу, тим менша тривалість імпульсів витрати.

- вентилявання паленища. Перед увімкненням подачі газу на пальник, паленище попередньо вентилюється для видалення з нього залишків газу та уникнення можливості вибуху. Тривалість вентилявання залежить від потужності дуттєвого вентилятора та об'єму паленища і димаря. Тривалість вентилявання може становити від 2 до 7 хв. Чим більшим є час вентилявання, тим більшими є паузи між імпульсами витрати газу.

Крім перелічених факторів частота імпульсів витрати газу, а також тривалість імпульсів та пауз між ними залежать від динамічних характеристик теплогенеруючого обладнання.

Зменшити похибку $\Delta T_{\text{ДГ}}$ 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.

Як видно із запропонованих заходів, встановлення теплової ізоляції на вимірювальній ділянці трубопроводу дозволить суттєво зменшити або й усунути взагалі додаткову систематичну похибку вимірювання температури потоку газу (ΔT). Товщину шару теплової ізоляції за заданим зниженням (підвищенням) температури газу на вимірювальній ділянці трубопроводу можна розрахувати згідно методики, представленої у [85], що розроблена на базі [249]-[251].

Виконання вказаних рекомендацій дозволить усунути вплив температурних умов протікання природного газу на точність вимірювання його витрати та об'єму за допомогою вузлів обліку, встановлених на теплогенеруючих об'єктах.

Висновки до розділу 5

Виконано моделювання перехідних процесів у системі автоматичного регулювання з нелінійним тепловим об'єктом із застосуванням різних схем автоматичного регулятора, а саме: аналоговий ПД-регулятор, імпульсний ПД-регулятор з подвійним диференціюванням, ПД-регулятор з імпульсним перетворювачем, ПД-регулятор з диференціатором та ШІМ, ПІ-регулятор з генератором імпульсів. На основі результатів моделювання встановлено, що найкращу якість перехідних процесів забезпечує схема ПД-регулятора з імпульсним перетворювачем (схема 3.3 згідно розробленої класифікації).

Досліджено перехідні процеси у системі автоматичного регулювання завантаженості кульового барабанного млина. На основі моделювання встановлено, що при імпульсній подачі сирого вугілля розмелювальна продуктивність млина є на 12 % 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.

На основі розроблених математичних моделей змодельовано похибки автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах, а саме: похибку вимірювання температури, зумовлену інерційністю термоперетворювача під час коливань параметрів потоку газу (ΔT_{in}), та похибку вимірювання температури, зумовлену теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника газу (ΔT_{LI}). Виявлення та усунення вказаних похибок є важливим кроком для підвищення точності обліку природного газу.

Розроблено заходи для підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах, що включають встановлення теплоізоляційної вставки між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу, а також встановлення теплоізоляції на вимірювальній ділянці трубопроводу. Виконання розроблених рекомендацій дозволить усунути вплив температурних умов протікання природного газу на точність вимірювання його витрати та об'єму за допомогою вузлів обліку, встановлених на теплогенеруючих об'єктах.

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 з ПД-регулятором та імпульсним перетворювачем, а також схему П-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 із 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 профільтрованого сигналу. За показник якості прийнято середнє значення квадрату відхилення профільтрованих точок від усереднених профільтрованих 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 профільтрованого 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 профільтрованого 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 розмелювальну 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. 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 вимірюваного значення завантаженості млина. 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 розмелювання 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.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Стефани С. П. Основы построения АСУ ТП: Уч. пособие для ВУЗов. - М.: Энергоиздат, 1982. – 352 с.
- [2] Дружинин Г.В. Автоматизированные системы управления технологическими процессами. - М.: Энергия; 1988. – 216 с.
- [3] АСУ ТП. Предпроектная разработка алгоритмов управления / Скурихин В.И., Дубровский В.В., Шифрин В.Б. - К.: Наук. думка, 1980. - 226с.
- [4] Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. – Львів: Вид-во ЗАТ «Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв», 2006 – 576 с.
- [5] Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. Л.: Машиностроение. Ленингр., 1989. – 701 с.
- [6] Пістун Є. П. Облік та економія природного газу // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 2. – С. 43–47.
- [7] 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
- [8] Федоришин Р. М., Савицький В. К., Кльось С. Р. Схеми автоматичних регуляторів та їх класифікація // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 16-17 травня 2017 р., Київ. – с. 160-161
- [9] *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
- [10] Федоришин Р. М., Савицький В. К., Кльось С. Р. Схеми імпульсних ПІД регуляторів // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної

- конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 17-18 травня 2016 р., Київ. – с. 195-196
- [11] 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/jeeecs2016.02.069>
- [12] Fedoryshyn R., Savytskyi V., Klyos S. Experimental Study of an Electric Oven and Development of Its Mathematical Model // *Proceedings of IX Annual Scientific Conference “Information Technologies and Automation – 2016”*, Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 20-21
- [13] Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos, Volodymyr Savytskyi. Development of Mathematical Model of Controlled Plant Using the Obtained Experimental Data // *Proceedings of 6th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”*. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 24-26.11.2016. – p. 189-190.
- [14] Федоришин Р. М., Кльось С. Р. Побудова математичної моделі теплового об’єкту на основі отриманих експериментальних даних // *Збірник тез доповідей 74-ї Студентської науково-технічної конференції, присвяченої 200-річчю з дня заснування Львівської політехніки, жовтень 2016 р., електронний опт. диск (CD-ROM), Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2016. – с. 94-95*
- [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/jeeecs2017.02.063>
- [16] Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos. Analysis of Pulse-Width Modulation Methods // *Proceedings of 7th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”*. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 23-25.11.2017. – p. 170-171.
- [17] Fedoryshyn R. M., Savytskyi V. K., Pistun Y. P., Klos S. R. Application of pulse-width modulator for thermal plant control // *Матеріали XXV міжнародної конференції з автоматичного управління “АВТОМАТИКА/AUTOMATICS - 2018” – Львів 18-19.09.2018. – с. 161-162.*

- [18] 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/jeeecs2018.02.093>
- [19] Sviatoslav Klos, Oleh Svyryd, Roman Fedoryshyn. Optimization of analog signal filtration process // *Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”*. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 129-130.
- [20] *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.*
- [21] *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.*
- [22] 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
- [23] 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.
- [24] 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.*

- [25] Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R. Controller-optimizer of ball mill performance // *Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2011”* – Львів 28-30.09.2011. – с. 406-407
- [26] 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, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2011.
- [27] 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. 188-189, “Nowa Energia” Publ.House, Raciborz (Poland)
- [28] Пістун Є.П., Заграй В.С., Николин Г.А., Федоришин Р.М. Регулятор-оптимізатор роботи кульового барабанного млина // *Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”*, НТУУ“КПІ”, 24-25 квітня 2012 р., Київ. – с. 251-252
- [29] Y. Pistun, V. Zahray, H. Nykolyn and R. Fedoryshyn. Improvement of a ball mill automation and optimization system // *Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2012”* – Київ 26-28.09.2012. – с. 242-243
- [30] 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, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2012.
- [31] Хімко Н. І., Федоришин Р. М. Математична модель кульового барабанного млина // *Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології – 2013”*. – Київ. – 2013. – С. 32-33.

- [32] 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
- [33] *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
- [34] *Y. Pistun, L. Lesovoy, R. Fedoryshyn*. Optimization of the differential pressure flowmeters by means of “Raskhod-RU” CAD // Journal of Hydrocarbon Power Engineering. Volume 1, Issue 1, 2014. p. 53-57.
- [35] *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.
- [36] *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.
- [37] *Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М.* Основні засади виконання аудиту систем обліку природного газу // Матеріали I Міжнародного конгресу “Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування”. – Львів. – 2009. – С. 127-128.
- [38] *Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М.* Удосконалення методики проектування теплоізоляції витратомірів газу // Збірник тез доповідей шостої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2009. - С. 85-86.
- [39] *R. Fedoryshyn, F. Matiko and Ye. Pistun*. Influence of heat exchange processes on the accuracy of natural gas volume measurement // Papers of The 15th

- VDE/ITG/GMA Conference “Sensors and Measuring Systems 2010”. Nuremberg, Germany – 2010. – p. 597-601.
- [40] *Є.П. Пістун, Ф.Д. Матіко, Р.М. Федоришин, Я.М. Власюк, В.М. Ярошевич* Дослідження додаткових похибок вимірювання температури та об’єму природного газу в системах його обліку // Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка”. Том 2 - Харків. - 2010. - С. 192-195.
- [41] *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.
- [42] *Федоришин Р., Матіко Ф.* Методика виконання експертизи систем обліку енергоносіїв з метою підвищення їх точності // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології - 2011. – Київ. – 2011. – С. 59-60.
- [43] *Рябцев Г., Федоришин Р., Матіко Ф.* Розробка спрощеної методики розрахунку коефіцієнта стисливості коксового газу // Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2011. – Львів. – 2011. – С. 18-19.
- [44] *Пістун Є.П., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М.* Попередні результати впровадження нових комплексів стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 і ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2009 в Україні // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 7.
- [45] *Рябцев Г., Федоришин Р., Матіко Ф.* Спрощена методика розрахунку коефіцієнта стисливості енерговмісних сумішей газів // Збірник тез доповідей 3-тньої науково-практичної конференції студентів і молодих учених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 133-134.

- [46] *V. Роман, Ф. Матіко, Р. Федоришин.* Методи визначення швидкості звуку в природному газі для вимірювання його витрати // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2012” – Київ 26-28.09.2012. – с. 436-437.
- [47] *Ye. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn.* “Raskhod-RU” CAD System for Computer Aided Design of Flowmeters for Fluid Energy Carriers // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-11, Colorado Springs, Colorado, USA
- [48] *Y. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn.* New CAD system for designing the pressure differential flowmeters // Papers of The 16th International Conference on Sensors and Measurement Technology “SENSOR 2013”. Nuremberg, Germany – 2013. – p. 700-705.
- [49] *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.
- [50] *Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д.* Інтегрування сигналу витрати газу в турбінних лічильниках // Матеріали XXI міжнародної конференції з автоматичного управління “АВТОМАТИКА - 2014” – Київ 23-27.09.2014. – с. 168-169.
- [51] *Пістун Є. П., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Мінін С. В.* “Спосіб калібрування побутових лічильників газу”, патент України на корисну модель № 95014 від 10.12.2014 р., бюл. № 23, 2014.
- [52] *R. Fedoryshyn, Y. Pistun, F. Matiko, V. Roman.* Improvement of Mathematical Model of Ultrasonic Flowmeter for Studying Its Errors in Disturbed Flows // Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF’15), Budapest, Hungary, September 01-04, 2015, pp.1-7.
- [53] *V. Roman, F. Matiko, R. Fedoryshyn.* CFD Simulation and Experimental Study of Ultrasonic Flowmeters // Proceedings of Conference “Young Scientists Towards

- the Challenges of Modern Technology 2015", September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-6, Warsaw, Poland.
- [54] *Matiko F. D., Roman V. I., Fedoryshyn R. M., Pistun Y. P.* Methodology of improvement of ultrasonic flowmeter mathematical model for studying its additional errors // Proceedings of IX Annual Scientific Conference "Information Technologies and Automation – 2016", Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 16-17.
- [55] *Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Крук С.Ю.* Особливості визначення коефіцієнта стисливості природного газу для систем його обліку // Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України "Облік природного газу та метрологія", 13-17.03.2017 р., Львів. – с. 11-14.
- [56] *Федоришин Р. М., Дичук П. В.* Автоматизований розрахунок похибок вимірювання температури газу // Збірник тез доповідей 76-ї Студентської науково-технічної конференції, жовтень 2018 р., електронний опт. диск (CD-ROM), Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – с. 98-100.
- [57] *Petro Dychuk, Roman Fedoryshyn.* Computer-aided design of gas flow temperature measurement errors // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum "Litteris et Artibus" & 13th International Conference "Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology". Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 135-137.
- [58] *Матіко Ф. Д., Пістун О. І., Федоришин Р. М.* "Спосіб вимірювання об'єму газу, зведеного до стандартних умов", патент України на корисну модель № 134376 від 10.05.2019 р., бюл. № 9, 2019.
- [59] *Матіко Ф. Д., Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Масняк О. Я.* Методики визначення обсягів дійсних втрат газу в газорозподільних мережах // Збірник тез доповідей Всеукраїнського семінару-наради "Приладовий облік природного газу, його нормативно-правове та метрологічне забезпечення" (Запоріжжя, 27-31 травня 2019 р.). – 2019. – С. 20–23.
- [60] *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.
- [61] 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 довкілля. Автоматизація. -2009. - № 659. - С. 73-78.
- [62] 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 довкілля. Автоматизація. -2010. - № 677. - С. 79-86.
- [63] 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.
- [64] 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.
- [65] 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/jeeecs2016.01.009>
- [66] 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.
- [67] Федоришин Р., Грень Я., Матіко Ф. Аналіз причин появи похибок вимірювання витрати природного газу, зумовлених змінами параметрів

- нестационарного потоку // Матеріали I Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2009. – Львів. – 2009. – С. 73-74.
- [68] *Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Костик І. В.* Дослідження резонансних явищ в імпульсних трубках витратомірів // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 21.
- [69] *Костик І. В., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М.* Дослідження резонансних явищ у пневматичних лініях вимірювальних перетворювачів систем обліку газу // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2013 р., Київ. – с. 252-253
- [70] *R. Fedoryshyn, F. Matiko, I. Kostyk and Y. Pistun.* Systematic Error of Gas Flow Rate Measurement Caused by Flow Pulsation // Proceedings of 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, April 14-17, 2015, CDROM version, pp.1-12, Arlington, Virginia, USA.
- [71] *I. Kostyk, F. Matiko, R. Fedoryshyn.* Effect of Flow Pulsations on the Accuracy of Differential Pressure Flowmeters // Proceedings of Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015”, September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-8, Warsaw, Poland.
- [72] *Roman Fedoryshyn, Fedir Matiko, Ihor Kostyk, Khrystyna Stefurak.* Mathematical Modeling and Experimental Study of Impulse Lines of Flowmeters // Proceedings of 5th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 26-28.11.2015. –р. 178-179.
- [73] *Костик І. В., Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д.* Моделювання пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 17-18 травня 2016 р., Київ. – с. 203-204.
- [74] *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 доквілля. Автоматизація. -2014. - № 795. - С. 62-66.
- [75] *Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М.* Розроблення алгоритму розрахунку теплопровідності природного газу з метою уточнення впливу теплообмінних процесів на точність його обліку // Збірник праць 5-ї міжнародної науково-практичної конференції “Проблеми економії енергії”. - Львів. - 2008. - С. 39-42.
- [76] *Федоришин Р. М., Комарецький О. А.* Вплив інерційності термодетандувача на точність вузла обліку природного газу в імпульсних режимах роботи // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2013 р., Київ. – с. 256-257.
- [77] *Федоришин Р., Комарецький О., Чура М.* Математичне моделювання температурного режиму потоку газу в системах його обліку при імпульсних режимах роботи // Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2013. Наукове електронне видання на CD-ROM – Львів. – 21-23.11.2013. –С. 58-61.
- [78] *Федоришин Р., Комарецький О., Чура М.* Моделювання імпульсних режимів роботи системи автоматизованого обліку природного газу // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Наукове електронне видання. Випуск № 1, 2014 р. – С. 250-256.
- [79] *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).
- [80] *Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Власюк Я. М., Ярошевич В. М.* Динамічна похибка вимірювання температури природного газу внаслідок інерційності термодетандувача // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 16-17 травня 2017 р., Київ. – с. 186-187.

- [81] Федоришин Р. М., Пістун О. І. Моделювання похибки вимірювання об'єму природного газу для імпульсного режиму потоку в системі обліку // Збірка тез тринадцятої міжнародної науково-практичної конференції “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ПРТК-2020)”, Київ, 19-20 травня 2020 р. – К: НАУ, 2020. – С. 145–147.
- [82] 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.xxxx-xxxx, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-xx-x, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria. DOI: 10.2507/31st.daaam.proceedings.xxx
- [83] Федоришин Р. М., Брилинський Р. Б., Масняк О. Я., Пістун О. І. Вплив імпульсного режиму потоку природного газу на точність його обліку // Матеріали IV-тої всеукраїнської науково-практичної конференції “Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку”, Луцьк, 29-30 жовтня 2020 р. – Луцький НТУ, 2020. – С. 88–89.
- [84] 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 доквілля. Автоматизація. -2008. - № 617. - С. 100-107.
- [85] 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.
- [86] 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.

- [87] *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.
- [88] *Fedoryshyn R., Matiko F.* Heat exchange between thermometer well and pipe wall in natural gas metering systems. *Energy Eng. Control Syst.*, 2015, Vol. 1, No. 1, pp. 43-48. <https://doi.org/10.23939/jeeecs2015.01.043>.
- [89] *Roman Fedoryshyn*. Improvement of accuracy of natural gas flow rate measurement by means of orifice plates in gas heating systems // *Papers of 5th Students' Scientific Conference “Man – Civilization – Future”*. Vol. 2. Wroclaw – 2007. - P. 137-145.
- [90] *Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М.* Побудова витратомірів газу, інваріантних до температурних змін потоку // Збірник тез доповідей п'ятої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2007. - С. 17-18.
- [91] *Федоришин Р., Матіко Ф.* Вплив теплообміну між гільзою термодетектора та трубопроводом на точність вимірювання температури природного газу в системах його обліку // *Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2010*. – Львів. – 2010. – С. 22-23.
- [92] *Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Крук С.Ю.* Вплив теплообмінних процесів на похибку вимірювання витрати та об'єму з допомогою лічильників газу // Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 24-25 квітня 2012 р., Київ. – с. 244-245.
- [93] *Ye. Pistun, F. Matiko and R. Fedoryshyn*. Additional Error of Flow Temperature Measurement and Its Influence on the Accuracy of Fluid Flowrate and Volume Measurement // *Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement*, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-18, Colorado Springs, Colorado, USA.

- [94] Федоришин Р. М., Демчишин І. Б. Теплообмін між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу в системах обліку природного газу // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2014 р., Київ. – с. 223-224.
- [95] Федоришин Р. М., Чура М. В., Мот В. Р. Теплообмін між потоком газу та корпусом роторного лічильника в автоматизованій системі комерційного обліку природного газу // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Наукове електронне видання. Випуск № 2, 2014 р. – С. 37-42.
- [96] Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Аналіз додаткової систематичної похибки вимірювання температури потоку природного газу в системах його обліку // Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України “Облік природного газу та метрологія”, 13-17.03.2017 р., Львів. – с. 20-21.
- [97] Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Пістун Є. П. Особливості вимірювання температури потоку природного газу в системах його обліку // Збірник тез доповідей 4-ої Міжнародної наукової конференції “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах”, ВНТУ, 31.10–2.11.2017 р., Вінниця. – с. 238.
- [98] Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Пістун Є. П., Зубко Т. О. Аналіз та розрахунок температурних умов роботи побутових лічильників газу // Збірник матеріалів доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції пам’яті професора Ігоря Кісіля “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”, ІФНТУ нафти і газу, 14–16.11.2017 р., Івано-Франківськ. – с. 95-97.
- [99] 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.

- [100] Проектування систем автоматизації: навч. посібник / М.С. Пушкар, С.М. Проценко – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 268 с.
- [101] Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.
- [102] Трегуб В.Г. Проектування систем автоматизації: Навч. посібник. – К.: Видавництво Ліра-К, 2017. – 344 с.
- [103] Втюрин В.А. Автоматизированные системы управления технологическими процессами: Учеб. для вузов / С-П.: ГЛТА, 2006. – 152 с.
- [104] Дворецкий С.И., Егоров А.Ф., Дворецкий Д.С. Компьютерное моделирование и оптимизация технологических процессов и оборудования: Учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2003. 224 с.
- [105] A. E. Bryson, "Optimal control-1950 to 1985," in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 16, no. 3, pp. 26-33, June 1996, doi: 10.1109/37.506395
- [106] Вариационное исчисление и оптимальное управление: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – 3-е изд., исправл. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. – 488 с.
- [107] Rao, Anil. (2010). A Survey of Numerical Methods for Optimal Control. *Advances in the Astronautical Sciences*. p. 135.
- [108] Автоматическое управление в химической промышленности: Учебник для вузов. Под. ред. Е. Г. Дудникова. – М.; Химия, 1987. 368 с.
- [109] Стефани Е. П. Основы расчета настройки регуляторов теплоэнергетических процессов, Госэнергоиздат, М. – Л., 1960.
- [110] Bequette, B. Wayne. *Process Control: Modeling, Design, and Simulation*. Prentice Hall PTR, 2002.
- [111] SIMATIC, Standard Software for S7-300 and S7-400 PID Control, User Manual, C79000-G7076-C516-01, Siemens AG 1996.
- [112] Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: справочное пособие/ А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. Товарнов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.

- [113] SIM960 Analog PID Controller. Operation and Service Manual. Stanford Research Systems. Revision 2.3. Sunnyvale, CA, USA. 2013.
- [114] Rooholahi, Babak & Reddy, Lokender. (2015). Concept and Application of PID Control and Implementation of Continuous PID Controller in Siemens PLCs. Indian Journal of Science and Technology. 8. p. 1 - 9. Doi: 10.17485/ijst/2015/v8i35/82262.
- [115] Tiberi, Ubaldo & Lindberg, C.F. & Isaksson, Alf. (2012). Dead-band self-triggered PI control for processes with dead-time. IFAC Proceedings Volumes. 45. p. 442-447. Doi: 10.3182/20120328-3-IT-3014.00075.
- [116] Механізми виконувальні електричні однооборотні МЭО-92. Руководство по експлуатації. ЯЛБИ.420136.007 РЭ
- [117] Прибори регулюючі програмуємі мікропроцесорні ПРОТАР. Інформац. матеріал (ГЕЗ.222.030 Д20). Московський завод теплової автоматики. 1987 г.
- [118] SIPART DR20 Compact Controller, Siemens. Project Planning Manual 02.05. 1990.
- [119] Структурні перетворення та дослідження систем автоматичного регулювання. - Методичні вказівки для самостійної підготовки та інструкція до лабораторної роботи N 5 з дисципліни «Теорія автоматичного керування» для студентів базового напрямку «Автоматизація і комп'ютерно-інтегровані технології» / Укл. Г.Б. Крих, Ф.Д. Матіко, Р.Я. Дубіль. Львів: Вид-во Національного ун-ту «Львівська політехніка», 2003. - 17 с.
- [120] Пістун Є. П., Стасюк І. Д. Основи автоматики та автоматизації: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. 336 с.
- [121] В. Савицький, Р. Федоришин. Технічні засоби автоматизації: навчальний посібник. – Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – 292 с.
- [122] Ю. И. Топчеев. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования. Москва, «Машиностроение». 1989 г. – 752 с.
- [123] Автоматическое регулирование и регуляторы в химической промышленности / Шарков А.А., Притыко Г. М., Палюх Б. В. – М.: Химия, 1990. – 288с.

- [124] Казаков А. В., Кулаков М. В., Мелюшев Ю. К. Основы автоматике и автоматизации химических производств. Учебное пособие для вузов. «Машиностроение», – М., 1970, стр. 376.
- [125] J.-K. Woo, D. Yang, K. Najafi, S. Lee, J. Mitchell. (2016). Miniaturized digital oven-control microsystem with high power efficiency and ± 1.8 ppm frequency drift. Frequency Control Symposium, 2016 IEEE International, pp. 1 – 4. DOI: 10.1109/FCS.2016.7563578.
- [126] Yajie Zhu *et al* (2019) Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* **677**, 032004. doi:10.1088/1757-899X/677/3/032004
- [127] Li, B.Y., K.H. Ang and C.Y. Chong, 2006. PID control system analysis and design. *IEEE Trans. Control Syst. Mag.*, 26: 32-41.
- [128] J. Korbel & R. Prokop. Aperiodic Principle for Automatic Controller Tuning // *Annals of DAAAM for 2011 & Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium*, Volume 22, No. 1, ISSN 1726-9679, ISBN 978-3-901509-83-4, Editor B. Katalinic, Published by DAAAM International, Vienna, Austria, EU, 2011, Pages 399-400.
- [129] *Fundamentals of HVAC Control Systems*, by Robert McDowall, 2008. p. 339.
- [130] Du, Ruoyang; Robertson, Paul (2017). "Cost Effective Grid-Connected Inverter for a Micro Combined Heat and Power System" (PDF). *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 64(7): p. 5360–5367. doi:10.1109/TIE.2017.2677340
- [131] Hirak Patangia, Sri Nikhil Gupta Gouriseti, "A Novel Strategy for Selective Harmonic Elimination Based on a Sine-Sine PWM Model", MWSCAS, U.S.A, Aug 2012.
- [132] Регулятор микропроцессорный МИК-51Н. Руководство по эксплуатации. ПРМК.421457.006РЭ1.
- [133] Программный пакет. Редактор FBD-программ АЛЬФА для контроллеров серий МИК-51 и МИК-52. Версия 2.0.0.705. Руководство по эксплуатации ПРМК.426000.003 РЭ.
- [134] Jazz Micro-OPLC. Рабочая панель и программируемый логический контроллер. Руководство пользователя. Unitronics. 2006.

- [135] Программный пакет “МИК-регистратор”. Версия 1.1.14. Руководство по эксплуатации ПРМК.426000.002 РЭ.
- [136] Gregory K. McMillan (ed) *Process/Industrial Instruments and Controls Handbook*. 5th Edition, McGraw Hill, 1999, p. 1333.
- [137] Рожкова Л. Д., Козулин В. С. *Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 648 с.*
- [138] Wu, S.; Guo, X.; Wang, R.; Liu, Y.; Lin, L.; Lei, Y. Reduction of Electromagnetic Interference for Permanent Magnet Synchronous Motor Using Random PWM Switching Method Based on Four-Switch Three-Phase Inverters. *Electronics* 2020, 9, p. 1998.
- [139] Michael M. Bech. *Analysis of Random Pulse-Width Modulation Techniques for Power Electronic Converters*. PhD dissertation, Aalborg University, Denmark, 2000, p. 332.
- [140] Wai-Kai Chen, *The Circuits and Filters Handbook*, CRC Press, 0-8493-8341-2, 1995.
- [141] Larry D. Paarmann, *Design and Analysis of Analog Filters*, Kluwer Academic Publishers, ISBN 0-7923-7373-1, 2001.
- [142] Wang, X., Cui, Y., Tao, Y. et al. A Flexible Low-Pass Filter Based on Laser-Induced Graphene. *Journal of Elec Materi* 49, 6348–6357 (2020). <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08462-7>
- [143] Bae, T.W.; Lee, S.H.; Kwon, K.K. An Adaptive Median Filter Based on Sampling Rate for R-Peak Detection and Major-Arrhythmia Analysis. *Sensors* 2020, 20, p. 6144.
- [144] W. Qin, M. T. Gamba, E. Falletti and F. Dovic, "An Assessment of Impact of Adaptive Notch Filters for Interference Removal on the Signal Processing Stages of a GNSS Receiver," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 56, no. 5, pp. 4067-4082, Oct. 2020, doi: 10.1109/TAES.2020.2990148.
- [145] Wilk, A.; Koc, W.; Specht, C.; Judek, S.; Karwowski, K.; Chrostowski, P.; Czaplewski, K.; Dabrowski, P.S.; Grulkowski, S.; Licow, R.; Skibicki, J.; Specht, M.; Szmaglinski, J. Digital Filtering of Railway Track Coordinates in Mobile Multi-Receiver GNSS Measurements. *Sensors* 2020, 20, p. 5018.

- [146] Shanmukhi, M., Harinath, K., Tabassum, N., Mubeen, M. Baseline wandering removal in ECG signal using filters. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, Vol. 9, Iss. 5, 2020, p. 7170-7175 DOI: 10.30534/ijatcse/2020/41952020
- [147] Feng, X.; Feng, Q.; Li, S.; Hou, X.; Zhang, M.; Liu, S. Wavelet-Based Kalman Smoothing Method for Uncertain Parameters Processing: Applications in Oil Well-Testing Data Denoising and Prediction. *Sensors* 2020, 20, p. 4541.
- [148] J. Wang, Q. Ni, Y. Zhang, X. Luo, Y. Shi et al., "Median filtering detection based on quaternion convolutional neural network," *Computers, Materials & Continua*, vol. 65, no.1, pp. 929–943, 2020.
- [149] M.N. Afnan Uda *et al* 2020 Design Low Noise Voltage Amplifier for Hand-Held Electronic Reader. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 864 012179. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/864/1/012179>
- [150] Hamming, R. W. *Digital filters*. – 3rd ed., New Jersey: Prentice-Hall, Englewood-Cliffs, 1989.
- [151] H. Dimopoulos. Optimal use of some classical approximations in filter design. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2007, Vol. 54, Iss. 9, pp. 780 – 784. DOI: 10.1109/TCSII.2007.900345
- [152] J. C. Ma, L. Luo, Q. B. Wu. A filter design method based on combination wavelets. *MSSP*, 1997, Vol. 11, Iss. 5, pp. 767 – 772. <https://doi.org/10.1006/mssp.1997.0105>
- [153] Richard J. Lyons. *Understanding digital signal processing*. Third ed. Prentice Hall Publ. 1996, 992 p.
- [154] N. K. Sinha, G. P. Rao. *Identification of Continuous-Time Systems: Methodology and Computer Implementation*, 1991, Kluwer Academic Publishers Norwell, 637 p.
- [155] Адаменко В. О. Автоматизація оброблення технічної інформації: конспект лекцій. – Київ.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 44 с.
- [156] Грень Я. В. Програмування систем реального часу: навч. посібник – Львів: в-во Львівської політехніки, 2011. – 324 с.

- [157] Стенсель Й. І. Математичне моделювання технологічних об'єктів керування: Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1993. – 328 с.
- [158] Полоцкий Л. М., Лапшенков Г. И. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации. – М.: Химия, 1982 – 296 с.
- [159] Luongo, A. & D'Annibale, F. 2020, "Modeling the linear dynamics of continuous viscoelastic systems on their infinite-dimensional central subspace", *Mathematics and Mechanics of Complex Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 127-151.
- [160] Bera, P. Development of Engine Efficiency Characteristic in Dynamic Working States. *Energies* 2019, 12, 2906, doi:10.3390/en12152906.
- [161] Nytrebych, Z., Ilkiv, V., Pukach, P., Malanchuk, O., Kohut, I. & Senyk, A. 2019, "Analytical method to study a mathematical model of wave processes under two-point time conditions", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 1, no. 7-97, pp. 74-83.
- [162] Ануфриев И.Е. Самоучитель MatLab 5.3/6.x – СПб. : БХВ-Петербург, 2002 г. – 736 с.
- [163] Graham C. Goodwin, Stefan F. Gradbe, and Mario E. Salgado, *Control System Design*, Prentice Hall, ISBN 0-13-958653-9, 2001
- [164] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice Hall, ISBN 0-13-060907-2, 2002
- [165] Plaskowski A. Eksperymentalne wyznaczanie własności dynamicznych obiektów regulacji. Wydawnictwo naukowo-techniczne, Warszawa, 177 s., 1965 r.
- [166] C.T. Jones. STEP 7 in 7 Steps: A Practical Guide to Implementing S7-300/S7-400 Programmable Logic Controllers, 2006.
- [167] Modicon M340 with Unity Pro. User Manual. 2008.
- [168] InTouch HMI Getting Started Guide. Invensys Systems, Inc. 2007.
- [169] Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов П.И., Кириченко В.В. Измельчение. Энергетика и технология. Учебное пособие для ВУЗов. - М.: Изд. дом "Руда и металлы", 2007. - 296с

- [170] S. Kamarova, S. Abildinova, A. Terziev, A. Elemanova. The efficiency analysis of the SH-25A ball drum mill when grinding industrial products of fossil fuels. E3S Web Conf. 180 01003 (2020), DOI: 10.1051/e3sconf/202018001003
- [171] Лаврентьев А.Ю., Толчинский Е.Н. Совершенствование методов расчета пылеприготовительных установок ТЭС. Электрические станции, 2003, № 12, с. 30-33.
- [172] Y. Pistun, S. Mysak, H. Matiko. Methods for Defining the Binary Coal Mixture Composition in the Pulverized Coal-Fired Boiler. Energy Engineering and Control Systems, 2017, Vol. 3, No. 1, pp. 1 – 8.
- [173] Pistun, Y., Zagraj, V. & Skobalo, A. (2002). Automatic control and optimization of ball mills, Proc. of VIII Forum of Power Engineers, Techn. Univ. of Opole, May 29–31, 2002, ISBN 83-88492-04-7, Kabza, Z. (Ed.), pp. 575-581, Publ.House of Tech. Univ. of Opole, Opole, Poland.
- [174] Формусатин В. П. Повышение производительности пылесистем на ТЭС. – Электрические станции, 2007, № 6, с. 1–4.
- [175] Левит Г. Пылеприготовление на ТЭС. Энергоатомиздат, ISBN 5-283-00151-2, Москва – 1991.
- [176] Bai, Y. & He, F. (2015), "Modeling on the effect of coal loads on kinetic energy of balls for ball mills", Energies, vol. 8, no. 7, pp. 6859-6880.
- [177] Яшин В.П., Бортников А.В. Теория и практика самоизмельчения. Москва: Недра, 1978. — 232 с.
- [178] Дружбляк О. М., Пистун Е. П., Трусъ А. И. Системы загрузки шаровых барабанных мельниц. – Энергетика и электрификация, 1984, №8, с. 29-32.
- [179] T. Chai, L. Zhai, and H. Yue, (2011). "Multiple models and neural networks based decoupling control of ball mill coal-pulverizing systems," Journal of Process Control, vol. 21, no. 3, pp. 351–366.
- [180] Feng, L., Yang, F., Zhang, W. & Tian, H. (2019). "Model Predictive Control of Duplex Inlet and Outlet Ball Mill System Based on Parameter Adaptive Particle Swarm Optimization", Mathematical Problems in Engineering, vol. 2019.

- [181] Lingfang, S., Jingmiao, S., Yinde, M., Congwei, F., Jibing, R. & Wei, Y. (2015), "Application research of PID-GPC algorithm in the ball mill system", *Open Automation and Control Systems Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 157-166.
- [182] Hu, Y., Ping, B., Zeng, D., Niu, Y. & Gao, Y. 2020, "Modeling of coal mill system used for fault simulation", *Energies*, vol. 13, no. 7.
- [183] Yifan Jian, Xianguo Qing, Yang Zhao, Liang He, Xiao Qi, "Application of Model-Based Deep Learning Algorithm in Fault Diagnosis of Coal Mills", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, Article ID 3753274, 14 pages, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/3753274>
- [184] Wang, W., Bai, X. & Liang, W. 2019, "Optimization and transformation of 300MV units steel ball coal mill Pulverizing System", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- [185] Zhu, L., Liu, S., Zhang, D., Qiu, X. & Zhou, W. 2019, "Coal mill fault diagnosis based on Gaussian process regression", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- [186] Bhatt, D.S., Dadiala, V. & Barve, J.J. 2018, "Industrial Coal Pulverizer Model Simulation and Parametric Investigation", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 115-120.
- [187] Pistun, Y., Mysak, S., Kovalenko, T. & Lys, S. 2017, "Development of the analytical method for determining the armor wear of the drum ball mill", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5, no. 1-89, pp. 45-50.
- [188] Terzić, A., Pezo, L. & Andrić, L. 2017, "Chemometric analysis of alternations in coal ash quality induced by application of different mechano-chemical processing parameters", *Science of Sintering*, vol. 49, no. 4, pp. 381-397.
- [189] Bai, Y. & He, F. 2015, "Modeling on the effect of coal loads on kinetic energy of balls for ball mills", *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 6859-6880.
- [190] Guo, S., Wang, J., Wei, J. & Zachariades, P. 2014, "A new model-based approach for power plant Tube-ball mill condition monitoring and fault detection", *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 10-19.

- [191] Huang, P., Jia, M. & Zhong, B. 2014, "Study on the method for collecting vibration signals from mill shell based on measuring the fill level of ball mill", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2014.
- [192] Плетьнов Г. П. «Автоматизовані системи управління об'єктами теплових електростанцій». Москва. Видавництво МСІ. 1995
- [193] *Power-Plant Control and Instrumentation. The Control of Boilers and HRSG Systems*, by David Lindsley, 2005, p.
- [194] Соловьев Ю. П., Михельсон А. И. Вспомогательное оборудование ТЭЦ, центральных котельных и его автоматизация. М. «Энергия», 1972 г., 256 с.
- [195] Фокин В.М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: Машиностроение, 2006. - 256 с.
- [196] Быстрицкий Г. Ф. Основы энергетики. М.: Инфра-М, 2007. 276 с.
- [197] Овсянников Н.Ф., Соломонов В.Д. Типовая энергетическая характеристика водогрейного котла ПТВМ-100 при сжигании природного газа. М.: Союзтехэнерго, 1986. 21 с.
- [198] Пістун Є.П., Лесовой Л.В. Сучасний стан нормативного забезпечення обліку плинних енергоносіїв // Збірник тез доповідей X-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування 2011: стан і перспективи». – Київ, 19-20 квітня 2011. – С.215-216.
- [199] Пістун Є.П. Облік плинних енергоносіїв: стан, проблеми, перспективи. Книга «Теплова енергетика – нові виклики часу», – Львів: НВФ «Українські технології», 2009. С. 580-594.
- [200] Пистун Е. П., Матико Ф. Д. Нормативно-техническая база измерений расхода и количества природного газа и его балансы в газотранспортных и газораспределительных системах. Сборник докладов 2-й Международной научно-практической конференции «Энергосбережение в системах тепло- и газоснабжения. Повышение энергетической эффективности». 31 мая - 2 июня 2011. Санкт-Петербург, Издательство «Политехника-сервис», 2011. С. 126-131.
- [201] Пістун Є.П. Інтелект на службі енергетики // Всеукраїнський інформаційно-іміджевий журнал «Інвест - Україна». - № 2, 2009. – С. 12-13.

- [202] Пістун Є.П. Стан і перспективи розвитку обліку плинних енергоносіїв // Матеріали VIII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Приладобудування 2009: стан і перспективи». – Київ, НТУУ «КПІ», 2009. – С. 14.
- [203] Пістун Є.П. Перспективи підвищення точності вимірювання витрати та кількості природного газу // Шоста Всеукраїнська науково-технічна конференція «Вимірювання витрати та кількості газу» : Збірник тез доповідей. 20–21 жовтня 2009р. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, Факел, 2009. – С. 4.
- [204] Пістун Є.П. Облік плинних енергоносіїв. Стан і перспективи розвитку. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні методи, інформаційне, програмне та технічне забезпечення систем управління організаційно-технічними комплексами», 26-27 листопада 2009р. Київ, НУХТ, 2009. С.14.
- [205] Universal Flow Monitors [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: www.flowmeters.com
- [206] Андріішин М. П., Канєвський С. О., Карпаш О. М., Марчук Я. С., Петришин І. С., Руднік А. А., Середюк О. Є., Чеховський С. А. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник. – Івано-Франківськ: ПП “Сімик”, 2004. – 160 с.
- [207] M. Turkowski. Metrologia przepływów. Warszawa, 2018, 284 s.
- [208] Michael Reader-Harris. Orifice Plates and Venturi Tubes. Springer, 2015 - 393 p.
- [209] ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 (ИСО 5167-1:2003) Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги (ГОСТ 8.586.1-2005, IDT; ISO 5167-1:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 98 с.– (Національний стандарт України)
- [210] ДСТУ ГОСТ 8.586.2:2009 (ИСО 5167-2:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 2. Діафрагми. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.2-2005, IDT; ISO 5167-2:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 90 с.– (Національний стандарт України).

- [211] ДСТУ ГОСТ 8.586.3:2009 (ИСО 5167-3:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 3. Сопла та сопла Вентурі. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.3-2005, IDT; ISO 5167-3:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 68 с.– (Національний стандарт України).
- [212] ДСТУ ГОСТ 8.586.4:2009 (ИСО 5167-4:2003). Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини і газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 4. Труби Вентурі. Технічні вимоги (ГОСТ 8.586.4-2005, IDT; ISO 5167-4:2003, MOD) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 53 с.– (Національний стандарт України).
- [213] ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009. Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 5. Методика виконання вимірювань (ГОСТ 8.586.5-2005, IDT) / Пістун Є.П., Лесовой Л.В. і ін. / [Чинний від 01.04.2010]. – К.: Держспоживстандарт України, 2010. – 196 с.– (Національний стандарт України).
- [214] ISO 5167-1:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1: General principles and requirements
- [215] ISO 5167-2:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 2: Orifice plates
- [216] ISO 5167-3:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 3: Nozzles and Venturi nozzles
- [217] ISO 5167-4:2003 Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 4: Venturi tubes
- [218] Личко А. А., Нестеренко Б. Н., Суслов В. Я. Учет и снижение влияния на показания расходомеров разницы температур измеряемого газа и окружающего воздуха // Материалы 19-й Международной научно-

- практической конференции «Коммерческий учет энергоносителей» – Санкт-Петербург 20-22 апреля 2004. – с. 130-135.
- [219] Волосянко В. Д., Волосянко Л. С. Неврахований вплив температурного чинника на достовірність приладного обліку витрат природного газу // Нафтова і газова промисловість. 2002. №6. С. 45-47.
- [220] R. McBrien and J. Geerligts. Effect of low flow and extreme ambient conditions on thermowell performance // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-9, Colorado Springs, Colorado, USA.
- [221] Cimerman, F., Jarm, M., Širok, B. & Blagojevič, B. 2016, "Taking in account measuring errors of volume conversion devices in measuring of the volume of natural gas", *Strojnicki Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, vol. 62, no. 2, pp. 95-104.
- [222] Stolwijk, J.J. & Mehrmann, V. 2018, "Error analysis and model adaptivity for flows in gas networks", *Analele Stiintifice ale Universitatii Ovidius Constanta, Seria Matematica*, vol. 26, no. 2, pp. 231-266.
- [223] Liu, E., Guo, B., Lv, L., Qiao, W. & Azimi, M. 2020, "Numerical simulation and simplified calculation method for heat exchange performance of dry air cooler in natural gas pipeline compressor station", *Energy Science and Engineering*, vol. 8, no. 6, pp. 2256-2270.
- [224] Лабай В. Й. Тепломасообмін: Підручник для ВНЗ. – Львів: Тріада Плюс, 2004. – 260 с.
- [225] Кривошеин Б. Л. Теплофизические расчеты газопроводов. – М., Недра, 1982, 168 с.
- [226] МВУ 034/03-2008. Об'єм природного газу за стандартних умов. Типова методика виконання вимірювань з використанням лічильника газу та коректора об'єму газу, Київ, 2008.
- [227] ISO 13443:1996 Natural gas – Standard reference conditions.
- [228] Ang K. H., Chong G., Li Y. PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Trans. on Control Syst. Tech.*, vol.13, No. 4, July 2005, p. 559-576.

- [229] Ziegler J. G., Nichols N. B., "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.
- [230] O'Dwyer A. PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey. *Proceedings of the American Control Conference*. Denver, Colorado June 4-6, 2003, pp. 1494- 1499.
- [231] Astrom, K.J. and Hagglund T. *Advanced PID control*. - ISA - The Instrumentation, System, and Automation Society, 2006, 460 p.
- [232] LI Y., ANG K.H, and CHONG G.C.Y. Patents, Software, and Hardware for PID control. An overview and analysis of the current art. *IEEE Control Systems Magazine*, Feb. 2006, p.41-54.
- [233] G. Reynoso-Meza, J. Sanchis, J.M. Herrero, C. Ramos. Evolutionary auto-tuning algorithm for PID controllers. *IFAC Proceedings Volumes*, V. 45, Iss. 3, 2012, P. 631-636, <https://doi.org/10.3182/20120328-3-IT-3014.00107>.
- [234] T.L. Blevins. PID Advances in Industrial Control. *IFAC Proceedings Volumes*, V. 45, Iss. 3, 2012, P. 23-28, <https://doi.org/10.3182/20120328-3-IT-3014.00004>.
- [235] Регулятор микропроцессорный МИК-21-05. Руководство по эксплуатации. ПРМК.421457.103РЭ.
- [236] Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – Київ: Либідь, 1997. – 544 с.
- [237] De-Jin Wang, Wei Li, Mei-Ling Guo, Tuning of PID controllers based on sensitivity constraint. *Journal of Process Control*, Vol. 23, Iss. 6, Jul. 2013, P. 861-867. doi:10.1016/j.jprocont.2013.04.003
- [238] Richard C. Dorf and Robert H. Bishop, *Modern Control Systems, Eighth Edition*, Addison-Wesley, ISBN 0-201-30864-9, 1998
- [239] Gene F. Franklin, J. David Powell and Abbas Emami-naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems (6th Edition)*, Prentice Hall, 0-13-601969-2, 2010
- [240] Brillhart, J., Montgomery, P.L. & Silverman, R.D. 1988, "Tables of Fibonacci and Lucas factorizations", *Mathematics of Computation*, vol. 50, no. 181, pp. 251-260.
- [241] Tan, E. & Leung, H.-. 2020, "Some basic properties of the generalized bi-periodic Fibonacci and Lucas sequences", *Advances in Difference Equations*, vol. 2020, no. 1.

- [242] Horla, D. & Sadalla, T. 2020, "Optimal tuning of fractional-order controllers based on Fibonacci-search method", ISA transactions, vol. 104, pp. 287-298.
- [243] Горбійчук М.І., Пістун Є.П.. Числові методи і моделювання на ЕОМ: Навчальний посібник – Івано-Франківськ: Факел, 2010. – 403 с.
- [244] Дружбляк О.М. Контроль и регулирование степени загрузки шаровых барабанных мельниц. – Энергетика и электрификация, 1984, №4, с. 18-21.
- [245] Дружбляк О.М., Пістун Е.П. Оптимизация процесса помола топлива на ТЭС. Тез. докл. на совещание «Повышение экономичности, надежности и маневренности энергетического оборудования ТЭС, работающего на непроектном и ухудшенного качества топливе». Львов, 1984. – М.: Союзтехэнерго, 1984, ч.2, с. 32-33.
- [246] Кулаков Г.Т., Кулаков А.Т., Кухоренко А.Н., Кравченко В.В. Теория автоматического управления. Учебно-методическое пособие. — Минск: БНТУ, 2017. — 133 с.
- [247] В. Я. Ротач. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами: учебник для вузов. М. – «Энергоатомиздат», 1985 г. – 296 с.
- [248] Кулаков Г.Т. Анализ и синтез систем автоматического регулирования. Минск: УП «Технопринт», 2003. – 135 с.
- [249] СНиП 41-03-2003 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
- [250] СНиП 2.04.14-88 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов.
- [251] Хоменко В.П., Фаренюк Г.Г. Справочник по теплозащите зданий. – К.: Будівельник, 1986. – 216 с.
- [252] ISO/TC30/SC9 N.202. Guide to the Selection of flowmeters.
- [253] Фединець В. О. Зменшення похибки від теплопровідності під час вимірювання температури газових потоків. Вісник: Теплоенергетика. Інженерія докiлля. Автоматизація. № 537, 2005, – с. 158-161.
- [254] ГОСТ 30319.0-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Общие положения.

- [255] ГОСТ 30319.1-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств природного газа, его компонентов и продуктов его переработки.
- [256] ГОСТ 30319.2-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости.
- [257] ГОСТ 30319.3-96 Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение физических свойств по уравнению состояния.
- [258] Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей./ Под ред. Варгафтика Н. Б. – М.: Недра, 1972 – 720 с.
- [259] Чиркин В. С. Теплофизические свойства веществ. – Москва.: Физматгиз, 1959. – 356 с.
- [260] Артюшин Л. М., Машков О. А., Дурняк Б. В., Сівов М. С. Теорія автоматичного керування: Навчальний посібник. – Львів: Вид-во УАД, 2004.–272 с.
- [261] ISO 5168: 2005. Measurement of fluid flow – Evaluation of uncertainty.
- [262] Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник. Перевод с немецкого. – Москва «Металлургия», 1980 – 544 с.
- [263] Чистяков С. Ф., Радун Д. В. Теплотехнические измерения и приборы. М.: Высшая школа, 1972.
- [264] Матіко Ф. Д., Учитель І. М. Дослідження температурного режиму ділянок газопроводу із змінними параметрами потоку // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація : Вісник НУ “ЛП”. – 2004. - № 506. – С. 245-250.
- [265] Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент. Справочник. Под общей редакцией Григорьева В. А. и Зорина В. М. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 2)
- [266] Поршаков Б. П., Бикчентай Р. Н., Романов Б. А. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): Учебник для вузов. – М.: Недра, 1987. – 349 с.

- [267] Матіко Ф. Д., Учитель І. М. Моделювання температурного режиму газового потоку при його протіканні через пристрої звуження // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація: Вісник НУ "ЛП". – 2003. - № 476. – с. 27-32.
- [268] М. А. Коновалов. Проблемы автоматизации инерционных теплоэнергетических объектов. - К. : Феникс, 2009. - 312 с.
- [269] A. Johnson and M.H. Moradi. PID Control: New Identification and Design Method. London: Springer Science+Business Media, 2005, 544 p.
- [270] Ю. В. Шульгин. Автоматизация тепловых процессов и установок : учеб. пособие по курсу "Автоматизация теплоэнергетических процессов" для студ. спец. 7.090510 "Теплоэнергетика" и 7.000008 "Энергетический менеджмент" - Х. : Национальный технический ун-т "Харьковский политехнический ин-т", 2002.
- [271] С. Ф. Артюх и др. Автоматизированные системы управления энергогенерирующими установками электростанций - Х. :, 2000. - 448 с.
- [272] Г. И. Канюк, А. Ю. Мезеря, И. В. Сук. Методы и модели энергосберегающего управления энергетическими установками электростанций: монография - Харьков: Точка, 2016. - 328 с.
- [273] О. І. Левченко, В. М. Сідлецький. Основи автоматизації теплоенергетичних процесів та установок: навч. посіб. для студентів теплоенергет. спец. ВНЗ. - Київ: НУХТ, 2014. - 227 с.
- [274] Ковриго Ю. М. Методика настроювання H_∞ -ПІД-регулятора для об'єктів із запізнюванням / Ю. М. Ковриго, Т. Г. Баган // Наукові вісті НТУУ «КПІ» : міжнародний науково-технічний журнал. – 2013. – № 1(87). – С. 27–33.
- [275] H.O. Méndez-Acosta, D.U. Campos-Delgado, R. Femat, V. González-Alvarez. Robust Feedforward/Feedback Control for a Class of Nonlinear Systems. IFAC Proceedings Volumes, V. 36, Iss. 11, 2003, P. 475-480. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)35709-9](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35709-9).
- [276] Rossiter, J.A., Zakova, K., Huba, M., Serbezov, A., and Visioli, A. (2019). A first course in feedback, dynamics and control: findings from an online pilot survey for the IFAC community. In IFAC ACE, Philadelphia, PA, USA

- [277] B. R. Kassimova, A. U. Sadvakassova and L. Zh. Sansyzbay. Research of the transient processes for discrete control systems. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 919 (2020) 032016. doi:10.1088/1757-899X/919/3/032016
- [278] Mitra S. K. Digital Signal Processing: A Computer-Based Approach 4. New York: McGraw-Hill Book Co. 2010. p. 940.
- [279] Andersson A. Measurement Technology for Process Automation. Boca Raton: Taylor and Francis, CRC Press. 2017. P. 196.
- [280] Mykhailenko V. S. Analysis of methods for adaptation of industrial control systems of thermal processes / V. S. Mykhailenko // Науковий вісник Національного гірничого університету. - 2014. - № 4. - С. 58-65.
- [281] Ukhina A. V. Sitnikov V. S. Transient process at low-order frequency dependent digital components. Radio Electronics, Computer Science, Control. 2018. No. 3, p. 40-47.
- [282] Catalog ST 70: Products for Totally Integrated Automation-SIMATIC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109744167/>
- [283] Modicon PLC and PAC Family Brochure [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.se.com/us/en/download/document/998-19797350/>
- [284] Unitronics – Excellence in Automation [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.unitronics.com/>
- [285] Allen-Bradley® programmable logic controller (PLC) and programmable automation controller (PAC) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.rockwellautomation.com/en-ro/products/hardware/allen-bradley/programmable-controllers.html>
- [286] Yokogawa Programmable Logic Controllers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/control-system/programmable-logic-controllers-plc-pac/>
- [287] Festo контроллеры [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.festo.com/cat/ru-uk_ua/products__02443

- [288] Omron Industrial Automation [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ia.omron.com/products/family/1916/download/catalog.html>
- [289] Delta – Programmable Logic Controllers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.deltaww.com/en-US/products/PLCProgrammableLogicControllers/ALL/>
- [290] ABB – PLC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://new.abb.com/plc/programmable-logic-controllers-plcs/ac500>
- [291] Мікрол. Засоби автоматизації технологічних процесів. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.microl.ua/>
- [292] Fatek® FBs PLC Catalog [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.fatek.com/en/download.php?act=list&cid=3>
- [293] Honeywell. MasterLogic: Compact and Modular PLC for High-Speed Applications [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.honeywellprocess.com/library/marketing/brochures/Honeywell-MasterLogic-Brochure.pdf>
- [294] Eaton. Programmable Logic Controllers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.eaton.com/us/en-us/products/controls-drives-automation-sensors/programmable-logic-controllers.html>
- [295] Fuji Electric. Programmable Controller PLC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.fujielectric.com/products/plc/catalog_download/
- [296] Mitsubishi Electric. Programmable Controllers MELSEC [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://www.mitsubishielectric.com/fa/id_en/download/catalog/cnt/plc.html
- [297] Hitachi. Programmable Logic Controllers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.hitachi-ies.co.jp/english/products/plc/index.htm>
- [298] Ладанюк А. П. Методи сучасної теорії управління : навч. посіб. для студ. ВНЗ / А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько, Н. М. Луцька, В. В. Іващук; Нац. ун-т харч. технологій. - К. : НУХТ, 2010. - 195 с.

- [299] Ладанюк А.П. Показатели функционирования и устойчивости систем с многопараметрическими регуляторами / А.П. Ладанюк, Д.О. Крониковский // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». – 2011. - №2. – С. 122 – 129.
- [300] Кроніковський Д. О. Застосування багатопараметричних регуляторів для складних технологічних об'єктів / Д. О. Кроніковський, А. П. Ладанюк // Харчова промисловість. - 2009. - №8. - С. 73 - 75.
- [301] Сборник задач и примеров по теории автоматического управления (оптимальное, экстремальное и программное управление) / В. А. Олейников, Н. В. Соловьев, А. М. Пришвин, Н. С. Зотов. - Москва: Высшая школа, 1969. - 200 с.
- [302] Виктор Денисенко. ПИД-регуляторы: вопросы реализации. Современные технологии автоматизации, 1/2008, с. 86-99.
- [303] Keel L. H. A new approach to digital PID controller design / L. H. Keel, J. I. Rego, S. P. Bhattacharyya // Automatic Control, IEEE Transactions on (Volume:48, Issue: 4), April 2003. - 2003. - P. 687-692
- [304] Математическая теория оптимальных процессов / Л. С. Понтрягин, В. Г. Болтянский, Р. В. Гамкрелидзе, Е. Ф. Мищенко. - Москва: Наука, 1976. - 392 с.
- [305] Джури Э. Импульсные системы автоматического регулирования / Э. Джури. - Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. - 455 с.
- [306] Система керування завантаженістю кульових барабанних млинів (СКЗ КБМ). Керівництво з експлуатації. ТзОВ НВПІ «Техприлад», Львів – 2020 р., 22 с.
- [307] ГОСТ 22261-94 Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.
- [308] ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия.
- [309] ГОСТ 4.191-85 СПКП. Приборы регулирующие электрические. Приборы, блоки и элементы функциональные, преобразователи электрические. Номенклатура показателей

ДОДАТОК А

А1. Опис системи керування завантаженістю кульових барабанних млинів

А1.1. Призначення

Система керування завантаженістю кульових барабанних млинів (СКЗ КБМ) призначена для підвищення ефективності процесу розмелювання матеріалу в однокамерних і багатокамерних кульових барабанних млинах, які застосовуються на гірничозбагачувальних, цементних, хімічних комбінатах, а також теплових електростанціях [306].

СКЗ КБМ забезпечує:

- вимірювання та розрахунок завантаженості кульового барабанного млина розмелюваним матеріалом;
- безперервне визначення розмольного потенціалу кульового барабанного млина;
- запобігання завалу кульового барабанного млина;
- оптимізацію процесу розмелювання, шляхом керування подачею сировини в кульовий барабанний млин, для досягнення такого значення рівня завантаженості, при якому забезпечується максимально можлива продуктивність;
- істотне зменшення витрат електричної енергії на розмелювання 1 т матеріалу;
- збільшення терміну роботи кульового заряду і зменшення зносу броні плит млина;
- формування інформації, яка необхідна для діагностики роботи кульового барабанного млина (кількість і стан кульового заряду, стан броні, стан перегородки);
- уніфікований струмовий сигнал про рівень завантаженості млина для автоматичних систем управління технологічним процесом розмелювання.

За кліматичними умовами експлуатації елементів СКЗ КБМ відноситься до групи 2 ГОСТ 22261-94 [307] і виконанню УХЛ 4.2 ГОСТ 15150-69 [308], при цьому значення температури повітря оточуючого середовища може знаходитись в діапазоні від -40 °С до 85 °С, верхнє значення відносної вологості повітря становить 80% при температурі 25 °С, а атмосферний тиск – 84-106,7кПа (630-800 мм. рт. ст.).

А1.2. Будова, принцип роботи та застосування СКЗ КБМ

А1.2.1. Будова СКЗ КБМ.

СКЗ КБМ складається з двох блоків SKWM-001 з акселерометрами типу АВС 117. До складу кожного SKWM-001 входить акселерометр типу АВС з перехідником, мікропроцесорний блок UE-2020 і захисний корпус (рис.А1.1).

Функціональна схема системи контролю завантаженості кульового барабанного млина показана на рис.А1.2.

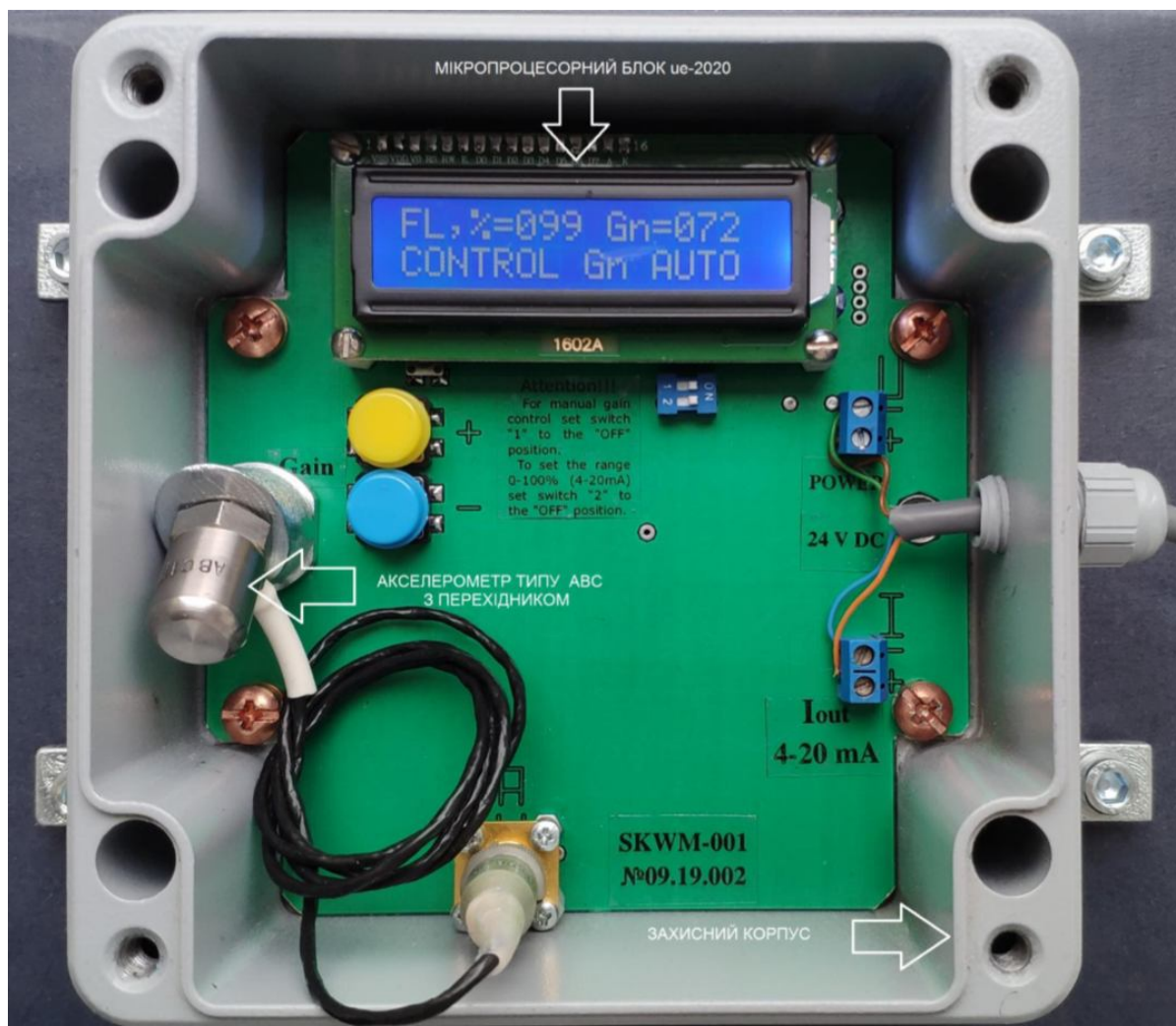


Рис.А1.1. Блок SKWM-001 системи контролю завантаженості КБМ.

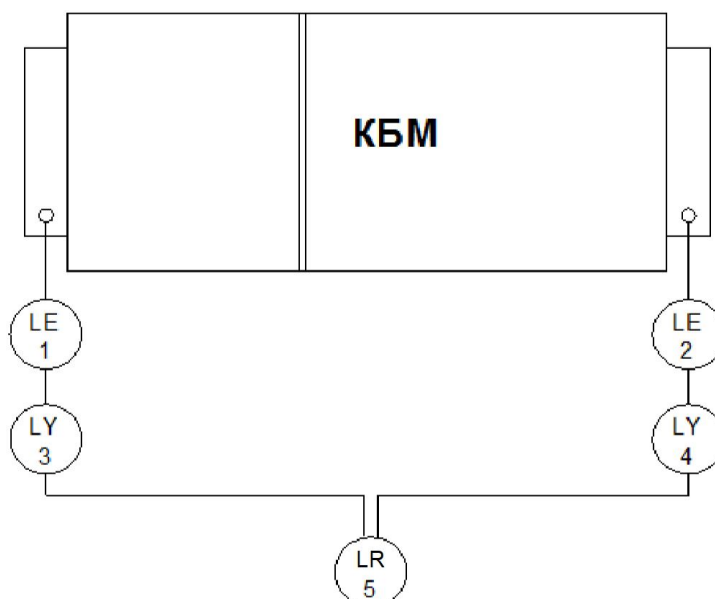


Рис.А1.2. Функціональна схема системи контролю завантаженості КБМ:
 1, 2—акселерометри типу АВС; 3, 4—блоки SKWM-001;
 5— реєстратор даних (або контролер АСКТП).

A1.2.2. Принцип роботи.

В основу принципу роботи SKWM-001 покладено метод вимірювання вібрації акселерометрами на вхідній і вихідній горловині млина з подальшою обробкою сигналів мікропроцесором. Ця вібрація виникає, як показано на рис.А1.3, під час падіння кулі на металеву поверхню.

Амплітуда вібрації безпосередньо залежить від товщини шару матеріалу між кулею та металевою поверхнею і змінюється із зміною кількості матеріалу у млині. При відсутності матеріалу вібрація буде максимальною, і навпаки, вона буде зменшуватись при збільшенні кількості матеріалу між кулею і металевою поверхнею. Крім того, на цю вібрацію також впливає діаметр кулі і фізико-механічні властивості матеріалу, що розмелюється. SKWM-001 виконує обробку сигналу вібрації і видає аналоговий струмовий уніфікований сигнал 4-20 мА, що відображає рівень завантаженості млина розмелюваним матеріалом. Цей рівень вимірюється від 0 до 100%.

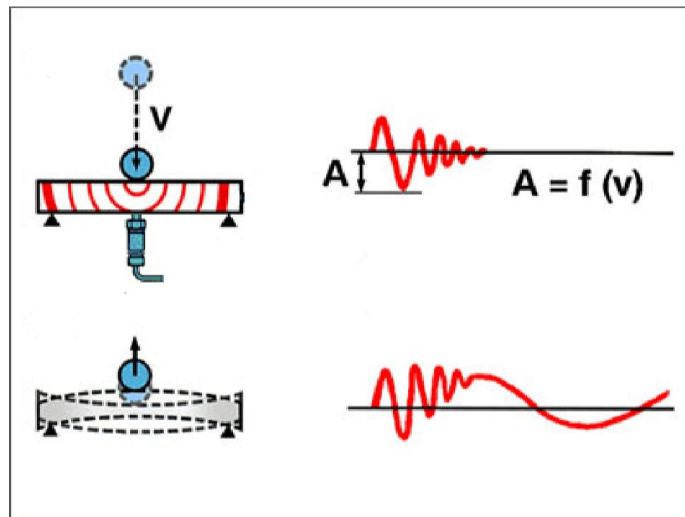


Рис.А1.3. Вимірювання вібрації акселерометром АВС.

A1.2.3 Застосування СКЗ КБМ.

СКЗ КБМ застосовується для вимірювання і розрахунку рівня завантаженості млина розмелюваним матеріалом. Нижче наведені приклади роботи СКЗ КБМ.

Приклад 1. Зміна рівня завантаженості млина при завантаженні розмелюваного матеріалу у млин.

Зростання рівня завантаженості млина розмелюваним матеріалом відбувається в період, коли кількість матеріалу, що подається на вхід млина (завантажується), є більшою за кількість, яка відбирається на виході (розвантажується):

$$Q \text{ завантаження} > Q \text{ розвантаження}$$

Зміна рівня завантаженості млина при завантаженні розмелюваного матеріалу у млин представлена на рис.А1.4. На рис.А1.4–А1.7 червона крива позначає рівень завантаженості вхідної горловини, зелена – рівень завантаженості вихідної горловини, синя – подача сировини в млин.

Як видно на рис.А1.4, завантаження матеріалу в млин (синя крива) зростає. Після цього спостерігається зростання рівня завантаженості на вхідному підшипнику млина (червона крива). Ця реакція дозволяє практично без запізнювання реагувати на зміни умов процесу подрібнення матеріалу в млині і запобігти настанню можливої аварійної ситуації. На цьому ж малюнку ми спостерігаємо повільне зростання рівня завантаженості на вихідному підшипнику млина (зелена крива). Швидкість зміни цього рівня залежить від швидкості руху матеріалу по млину, а також розмольного потенціалу самого млина.

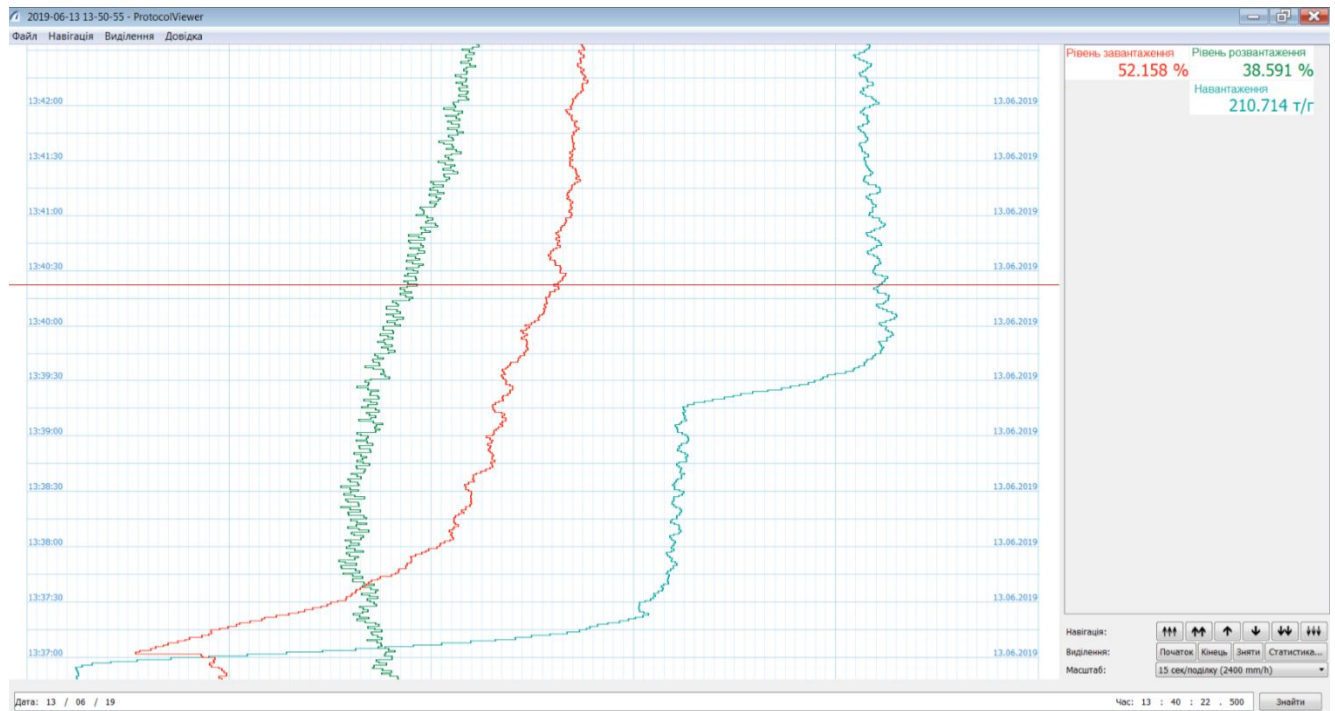


Рис.А1.4. Завантаження млина розмелюваним матеріалом.

Приклад 2. Зміна рівня завантаженості млина при розвантаженні млина розмелюваним матеріалом.

Зменшення рівня завантаженості млина розмелюваним матеріалом відбувається в період, коли кількість матеріалу, що подається на вхід млина (завантажується), є меншою за кількість, яка відбирається на виході (розвантажується):

$$Q \text{ завантаження} < Q \text{ розвантаження}$$

На рис.А1.5 ми спостерігаємо зменшення рівня завантаженості на вхідному підшипнику млина після відключення завантаження сировини в млин. Як бачимо, зменшення рівня завантаженості йде повільно через наявність повернення не домеленого матеріалу з класифікатора (сепаратора). Чим більша кількість повернення і чим він більший, тим повільніше буде зменшуватися рівень завантаженості, і навпаки, чим менша кількість повернення і чим він дрібніше, тим швидше буде зменшуватися рівень завантаженості. Крім цього, ця швидкість зміни залежить від швидкості руху матеріалу по млину і розмольного потенціалу самого млина.

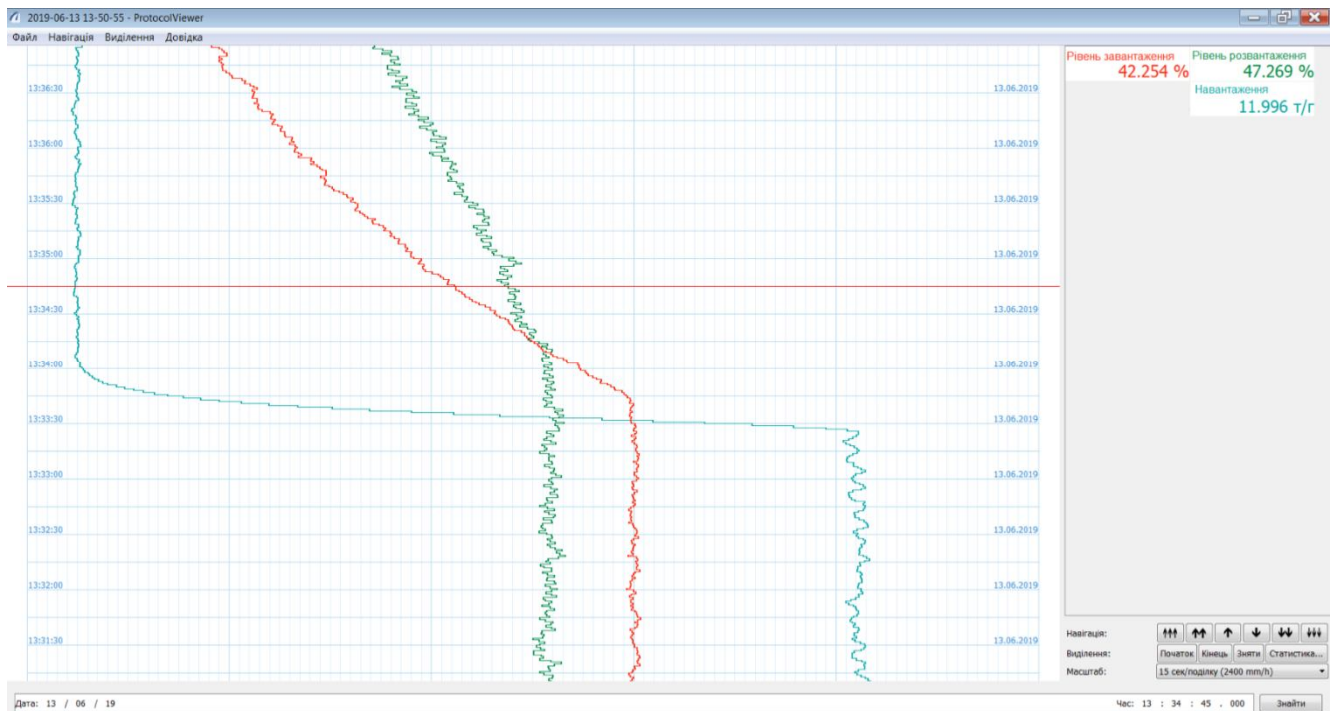


Рис.А1.5. Розвантаження млина.

Приклад 3. Стабілізація рівня завантаженості млина при досягненні балансу між завантаженням і розвантаженням млина розмелюваним матеріалом.

Стабілізація рівня завантаженості млина розмелюваним матеріалом відбувається в період, коли кількість матеріалу, що подається на вхід млина (завантажується), дорівнює кількості, яка відбирається на виході (розвантажується):

$$Q \text{ завантаження} = Q \text{ розвантаження}$$

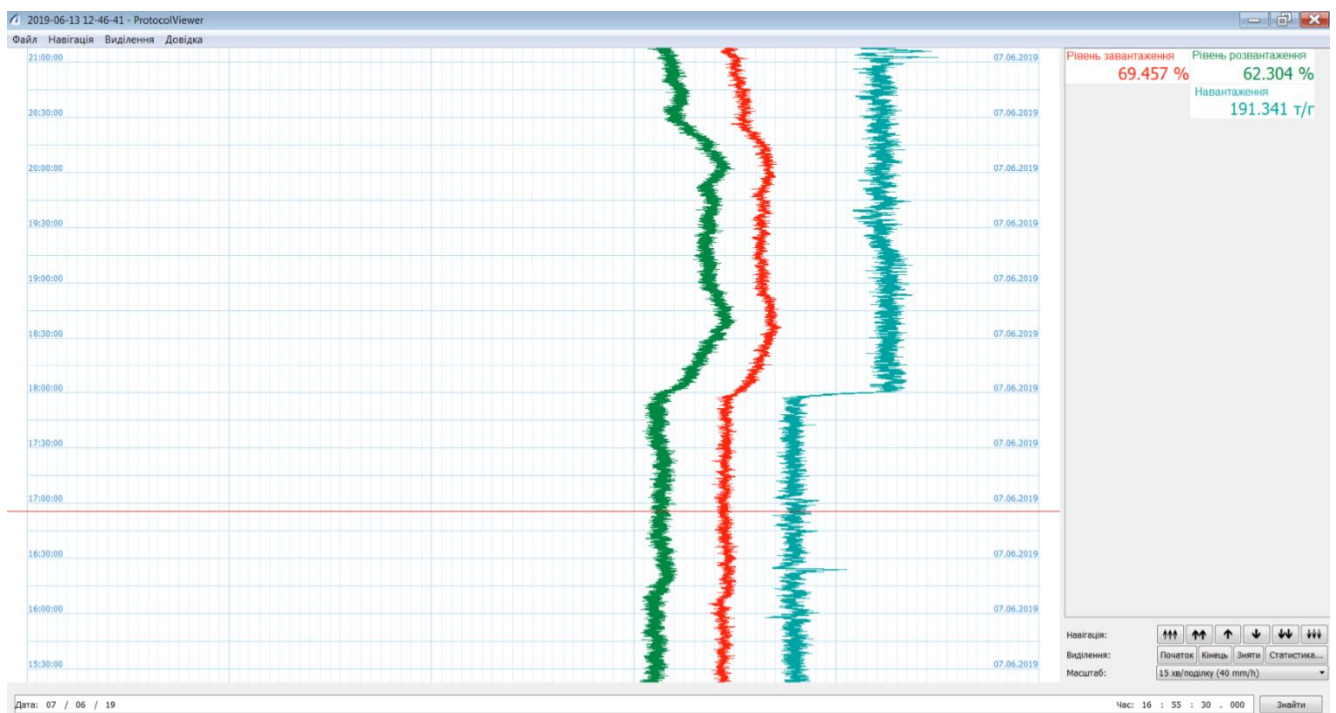


Рис.А1.6. Стабілізація рівня завантаженості млина.

На рис. А1.6 спостерігається стабілізація рівня завантаженості млина до 18:00. Наступна зміна кількості матеріалу в млин розбалансовує його роботу. Подальші зміни параметрів технологічного процесу подрібнення або фізико-механічних властивостей матеріалу, що розмелюється, призведе до зміни рівня завантаженості. При оптимальній роботі КБМ середній рівень завантаженості повинен знаходитися в діапазоні від 65% до 85% в залежності від фізико-механічних характеристик розмелюваного матеріалу і якості готового продукту. У виняткових випадках він може доходити і до 90%. При підвищених рівнях завантаженості падає якість розмелювання матеріалу. Обмеження максимального середнього значення рівня завантаженості дозволяє запобігти завалу млина. Чим меншим є середній рівень завантаженості, тим більшим є знос кульового заряду і броні (плит) млина. Не рекомендується утримувати значення середнього рівня нижче 50%. А при значенні нижче 30% забороняється довготривала експлуатація КБМ. При середньому рівні від 75% і вище спостерігається падіння витрат електричної енергії на розмелювання, в середньому близько 10%. Крім того, при оптимальній завантаженості млина збільшується термін роботи кульового заряду і зменшується знос броні (плит) КБМ. В однокамерних млинах рівень завантаженості входної горловини має бути вище на 5 – 25% від рівня завантаженості вихідної горловини. В багатокамерних млинах рівень завантаженості в камерах буде залежати від умов технологічного процесу.

Приклад 4. Довантаження куль в млин.

Аналіз сигналів СКЗ КБМ дозволяє виконати діагностику роботи КБМ (кількість і стан кульового заряду, довантаження куль, стан броні, швидкість руху матеріалу в млині і ін.) та пилесистеми в цілому (роботу периферійного обладнання). Нижче наведено приклад довантаження куль в млин при зупинці подачі сировини в млин.

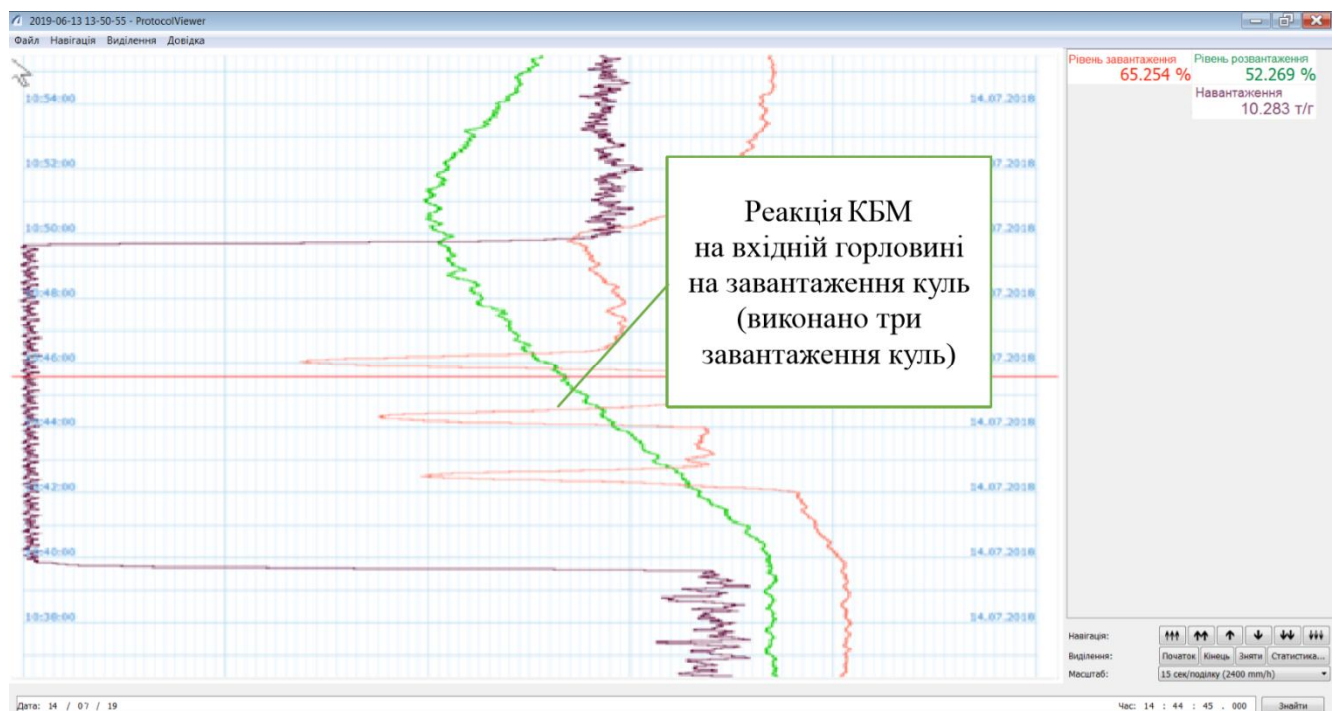


Рис.А1.7. Реакція КБМ на довантаження куль.

Як видно з рис.А1.7, додавання куль в млин стрибкоподібно змінює значення рівня завантаженості на входній горловині. Значення цієї стрибкоподібної зміни буде залежати від

кількості довантажених куль, періоду (швидкості) довантаження, витрати сировини в млин, а також рівня завантаженості млина сировиною в цей момент. Після довантаження куль і відновленні подачі сировини в млин змінюються значення рівнів завантаженості на вхідний і вихідний горловині. За цими значеннями і різницею між ними можна визначати ефективність роботи кульового заряду. Чим більшою є різниця між рівнем завантаженості вхідної і вихідної горловини, при стабільній швидкості руху матеріалу по млину, тим ефективнішою є робота куль.

Швидкість матеріалу в млині можна визначати за часом реакції значення рівня завантаженості вихідної горловини на зміну рівня завантаженості на вхідній горловині. Якщо істотне довантаження куль не змінює рівень завантаженості млина (особливо, коли млин вихолощений), то це свідчить про слабкий потенціал броні (плит) піднімати кулю, тобто броня (плити) млина є у зношеному стані. Низькі рівні завантаженості в млині, який є завантажений сировиною, свідчать про неефективну роботу кульового заряду або перевантаженість млина кулями. Діагностика роботи млина за допомогою СКЗ КБМ дає можливість оптимізувати кульове завантаження і максимально ефективно експлуатувати КБМ.

Приклад 5. Застосування СКЗ КБМ у складі різних схем автоматизації.

На підприємствах зі спрощеною схемою автоматизації СКЗ КБМ застосовується для моніторингу роботи КБМ (рис.А1.8). У цьому випадку оператор стежить за показами СКЗ КБМ і в ручному режимі керує подачею матеріалу в млин.

Як видно з рис.А1.8, стабільна подача сировини в млин не гарантує стабільний рівень завантаженості млина, оскільки якість сировини змінюється. Коливання грануляції сировини і її фізико-механічних властивостей приводить до коливання рівня завантаженості млина. Ці зміни безпосередньо впливають на якість розмелювання вихідного продукту.

Більш ефективно є інтегрувати СКЗ КБМ в АСКТП процесу розмелювання (див.рис.А1.10). Оператор встановлює завдання середнього рівня завантаженості млина, а регулятор автоматично підтримує цей рівень. Таким чином забезпечується стабільність якості розмелювання вихідного продукту. Приклад мнемосхеми АСКТП з інтегрованою СКЗ КБМ представлено на рис.А1.9.

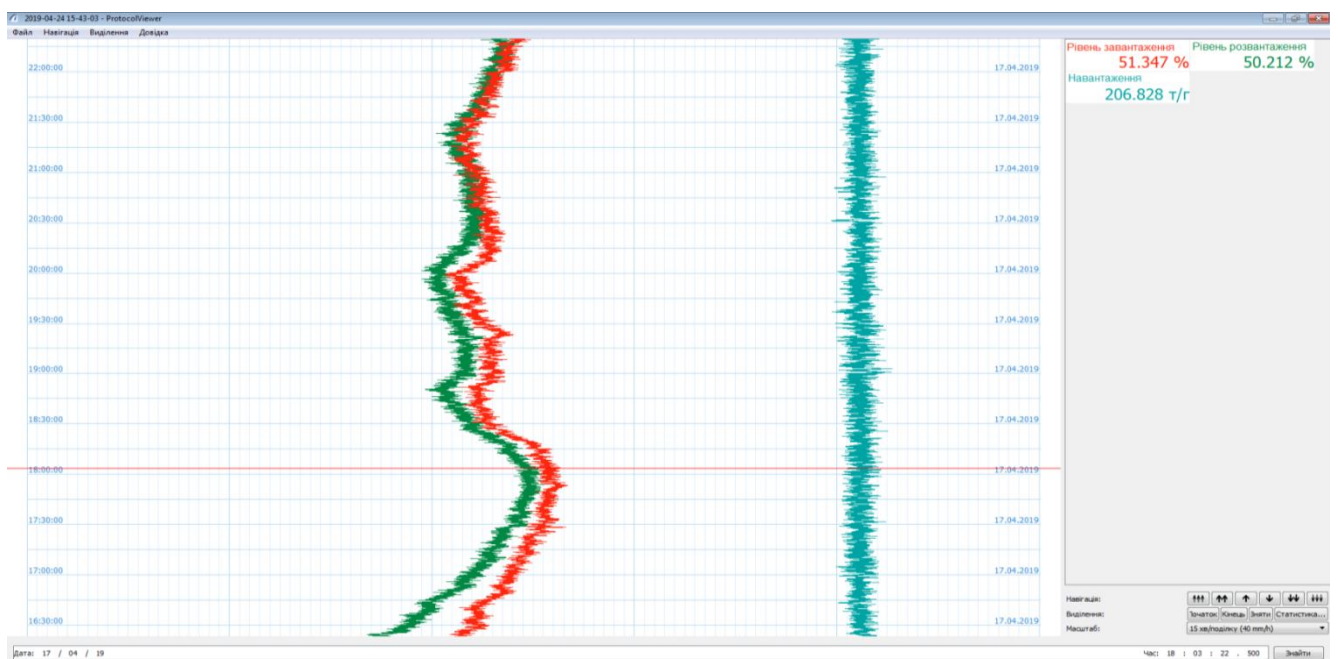


Рис.А1.8. СКЗ КБМ в режимі моніторингу роботи КБМ

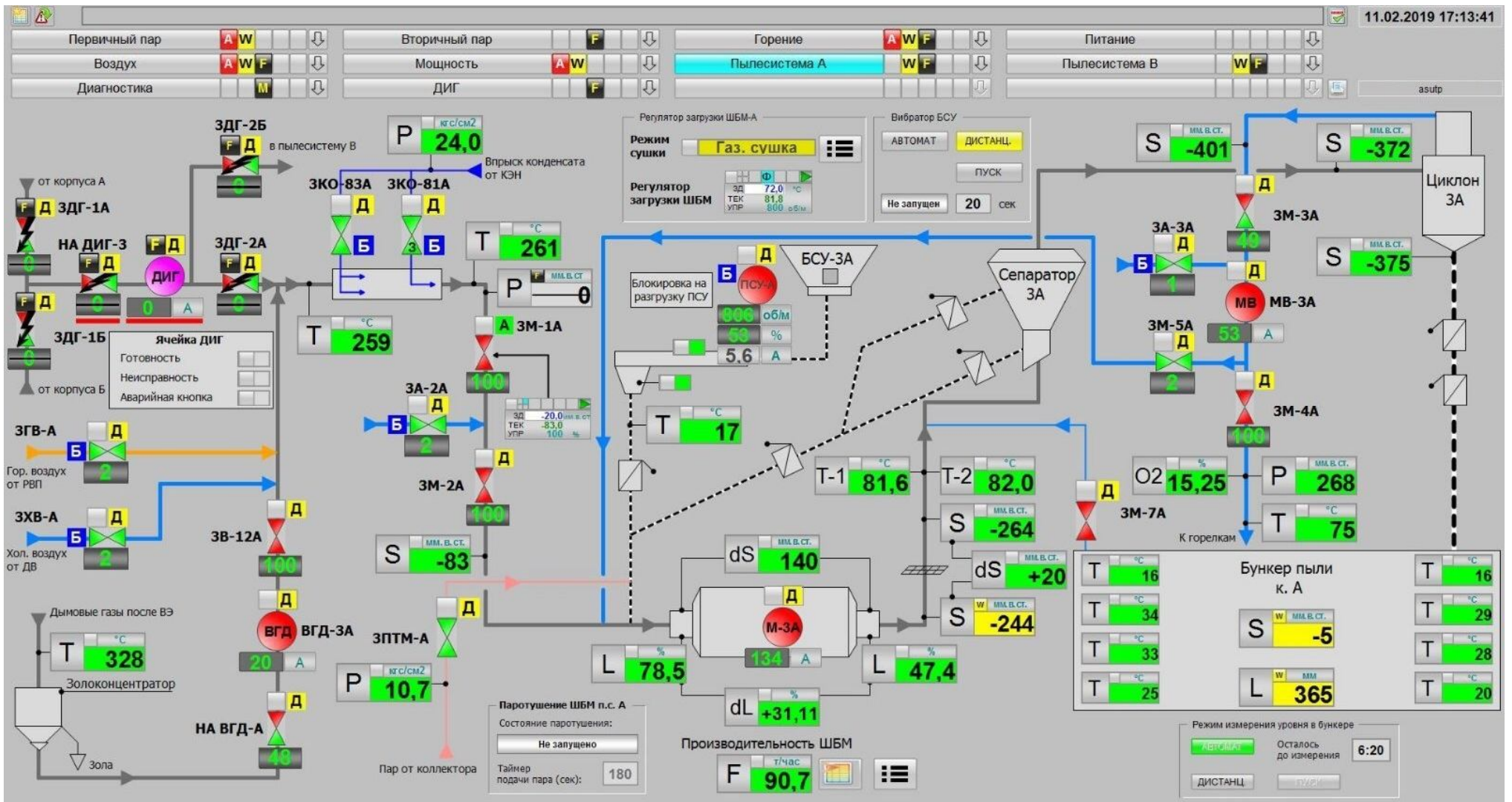


Рис.А1.9. Мнемосхема АСКТП размелювання вугілля з інтегрованою СКЗ КБМ [306].

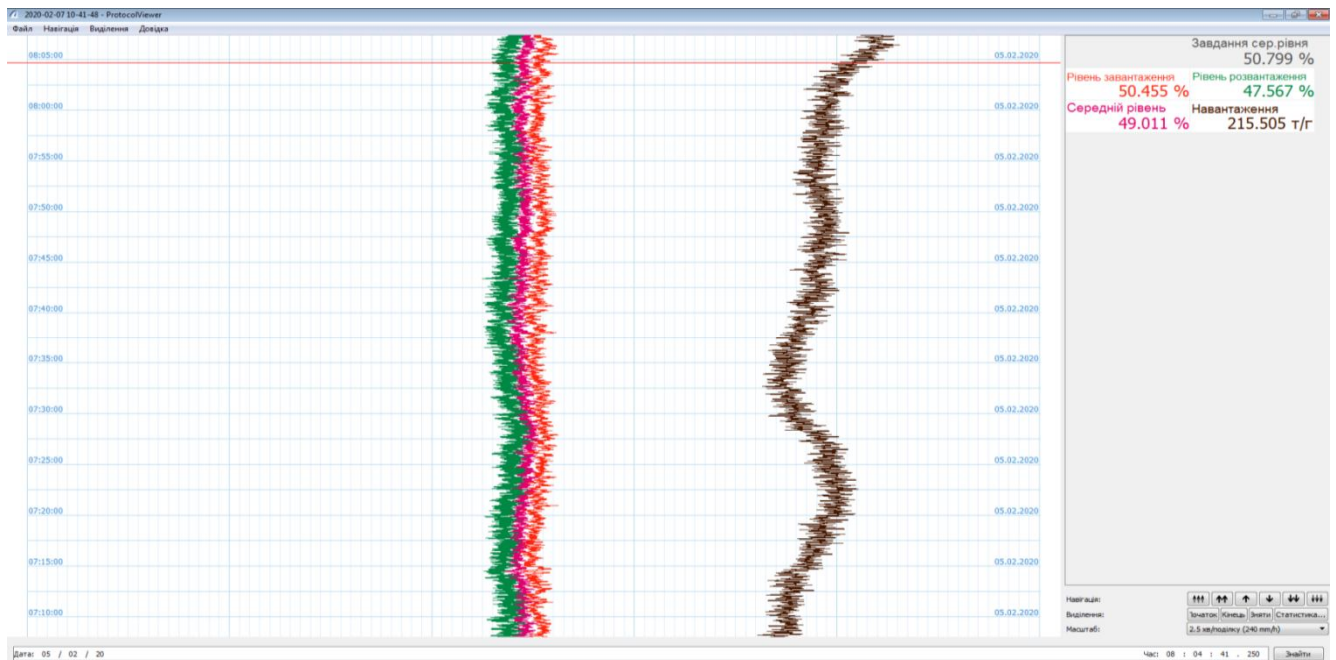


Рис.А1.10. Робота СКЗ КБМ в складі АСКТП.

А1.3. Підготовка СКЗ КБМ до роботи

А1.3.1 Розпакування блоків СКЗ КБМ.

А1.3.1.1 При отриманні СКЗ КБМ вийняти блоки системи з пакувальної тари і очистити від пилу. Якщо блоки системи знаходилися в кліматичних умовах, відмінних від робочих, то необхідно поставити їх на 4 години в камеру тепла з температурою 35 °С або витримати в сухому теплому приміщенні не менше 12 годин.

А1.3.2 Порядок установки і монтажу.

Визначаємо місце установки SKWM-001 на підшипнику (якщо млин крутиться за годинниковою стрілкою – то SKWM-001 кріпиться з правого боку, тобто з того боку, де падають кулі (рис.А1.11). Зачищаємо обрану поверхню до рівного гладкого стану. Прикладаємо SKWM-001 до зачищеного місця і по черзі розмічаємо отвори для кріплення або наклеюємо шаблон з готовою розміткою отворів для кріплення SKWM-001. По черзі свердлом діаметром 5 мм просверджуємо отвори на глибину 12 мм і мітчиком М6 нарізаємо різьбу. Болтами М6 надійно фіксуємо корпус SKWM-001 на передньому і задньому підшипниках КБМ.

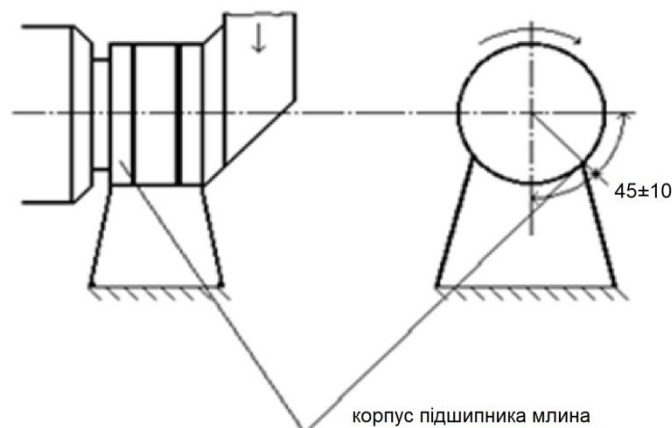


Рис.А1.11. Схема розташування SKWM-001.

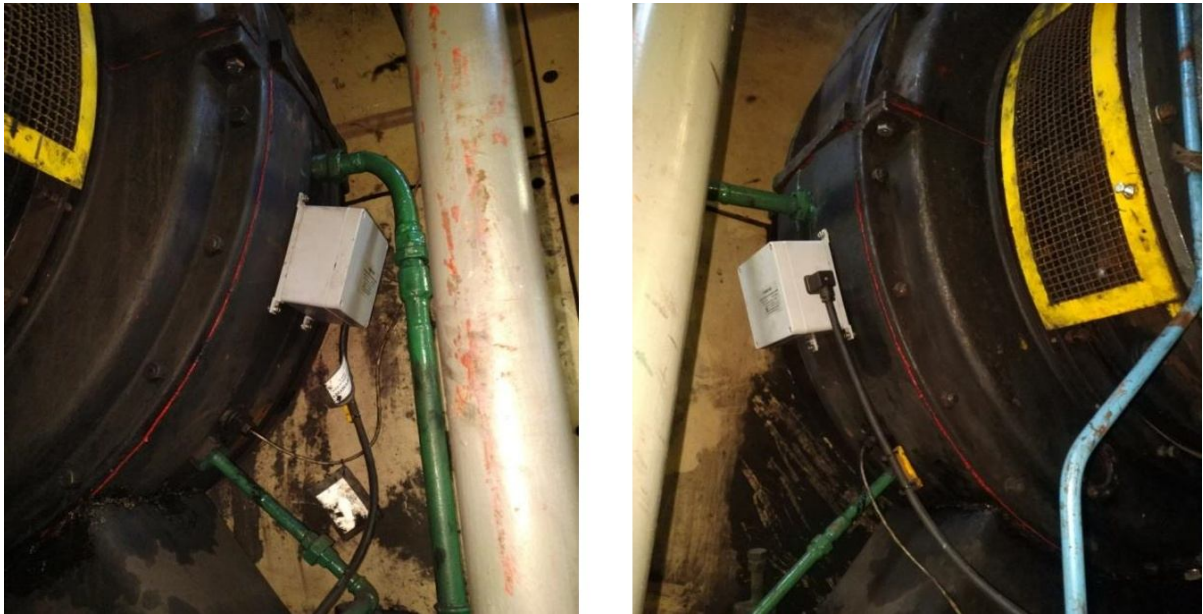
*a**б*

Рис.А1.12. Вхідна (*a*) та вихідна (*б*) горловина КБМ.

У разі відсутності можливості просвердлювання отворів в корпусі підшипника КБМ (товщина стінки <10 мм) допускається приварювання кронштейнів SKWM-001. У разі неможливості кріплення SKWM-001 на підшипниках млина, їх кріплять в зоні вільного доступу поблизу млина.

У версії індивідуального монтажу акселерометра на підшипнику КБМ або всередині корпусу SKWM-001, вище згаданим методом, висвердлюємо і нарізаємо один отвір М10 або 3 отвори М6. Болтами М6 або М10 надійно закріплюємо підставку разом з акселерометром (див.рис.А1.13).

Після монтажу акселерометра з підставкою, за допомогою будівельного кутоміра перевіряємо кут нахилу акселерометра. Він повинен знаходитися в діапазоні від 45° до 50°. Якщо кут нахилу акселерометра знаходиться за межами цього діапазону, замінюємо підставку або регулюємо її. В регульованій підставці для встановлення кута нахилу потрібно звільнити болт тримача акселерометра і встановити кут між 45° і 50°. Після цього затягнути болт.

Підключаємо акселерометр до плати UE-2020.

*a**б*

Рис.А1.13. Регульований (*a*) та нерегульований (*б*) перехідник під акселерометр, розміщений всередині SKWM-001.

A1.3.3 Підготовка до роботи.

Підключити кабель живлення 24 В п.с. згідно схеми на рис. A1.14. Підключити кабель вихідного струмового сигналу 4–20 мА згідно зі схемою на рис. A1.14. Подати постійну напругу $24\text{В} \pm 10\%$, 1А. Активний сигнал 4–20 мА підключається до аналогового входу контролера АСКТП, регулятора, реєстратора.

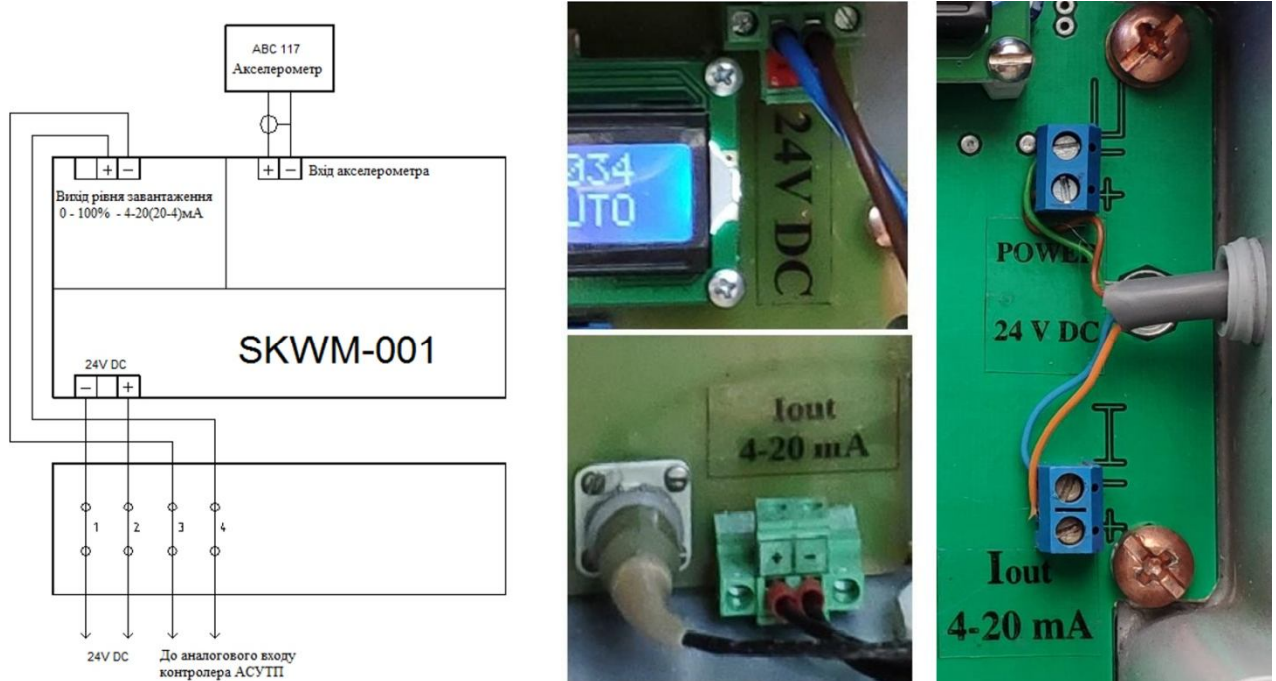


Рис. A1.14. Підключення SKWM-001.

A1.4. Калібрування блоку SKWM-001

В блоці SKWM-001 передбачена можливість ручного та автоматичного калібрування каналу вимірювання рівня завантаженості млина. Основною задачею калібрування є встановлення такого коефіцієнту підсилення, при якому рівень завантаження млина при працюючому вихолощеному млині буде близько «0%». При шкалі 4–20мА (100%–0%), «0%» відповідає вихідному сигналу 20мА, а «100%» (встановлюється заводом-виробником програмно) – 4 мА.

A1.4.1. Ручне калібрування.

Ручне калібрування виконують в наступній послідовності:

- а) Викрутити 4 болти і зняти верхню кришку.
- б) Перевірити кріплення акселерометра (мають бути міцно затягнуті болти перехідника і сам акселерометр) і кут акселерометра (має бути в межах $45^\circ - 50^\circ$). За необхідності провести коригування кута акселерометра.
- в) Перевести перемикач 1 в положення «OFF». На дисплеї SKWM-001 напис «KALIBRACJA AUTO» зміниться на «KALIBRACJA RECZ».
- г) Червоною кнопкою (Wz+) або синьою (Wz-) виставити такий коефіцієнт підсилення (Wz), при якому рівень завантаження вихолощеного працюючого млина буде рівний 2 – 5%. Коефіцієнт підсилення можна змінювати в діапазоні від 0 до 255. Ця операція виконується тільки в режимі «KALIBRACJA RECZ» SKWM-001.

A1.4.2. Автоматичне калібрування.

Автоматичне калібрування виконують в наступній послідовності:

а) В режимі “KALIBRACJA RECZ” при непрацюючому млині червоною кнопкою (Wz+) виставити коефіцієнт підсилення $Wz=255$.

б) Перевести перемикач 1 в положення «ON». На дисплеї SKWM-001 напис “KALIBRACJA RECZ” зміниться на “KALIBRACJA AUTO”. Встановити перемикач 2 в положення «ON» для 4 мА – 0%, 20мА – 100% або в положення «OFF» для 4 мА – 100%, 20 мА – 0%.

в) Закрити корпус кришкою і закрутити 4 болти.

г) Запустити млин без подачі сировини (вихолостити млин). При зменшенні рівня завантаження нижче 3% SKWM-001 за спеціальним алгоритмом автоматично зменшує коефіцієнт підсилення Wz. При вихолощеному млині достаньмо 3 хвилин для автоматичного самокалібрування вимірювального каналу рівня завантаженості розмелюваним матеріалом.

У випадку довантаження куль (збільшення кульового заряду) і короткому вихолощенню млина, блок SKWM-001 в режимі “KALIBRACJA AUTO” автоматично докалібрується. Зменшення кульового заряду і стирання броні (плит) приводить до збільшення виміряного рівня завантаженості. При суттєвих змінах вищезгаданих параметрів треба повторно провести автоматичне самокалібрування.

Автоматичне самокалібрування блоку SKWM-001 рекомендовано проводити після ремонту млина. Це дає можливість провести діагностику кульового заряду і стану плит. За рівнем завантаженості розмелюваним матеріалом при вихолощеному працюючому млині можна виконувати корекцію кульового заряду млина. Докладання куль (збільшення кульового заряду) веде до зменшення виміряного рівня завантаженості млина. Кулі потрібно докладати в млин малими порціями до такого рівня, при якому рівень завантаженості при вихолощеному працюючому млині буде рівний 2 – 5%. Перед докладанням куль потрібно перевірити стан броні, оскільки це впливає на висоту підняття куль і вібрацію, що виникає при падінні куль на броню.

A1.4.3. Віддалене калібрування.

Блок SKWM-001В дозволяє виконати калібрування віддалено каналом бездротового зв'язку. У блоці SKWM-001В є вбудований Bluetooth модуль, який дозволяє дистанційно керувати SKWM-001В з комп'ютера, планшета або смартфона. На рис. A1.15-A1.29 наведено приклад роботи SKWM-001В зі смартфоном з операційною системою Android та встановленим додатком Serial Bluetooth Terminal.

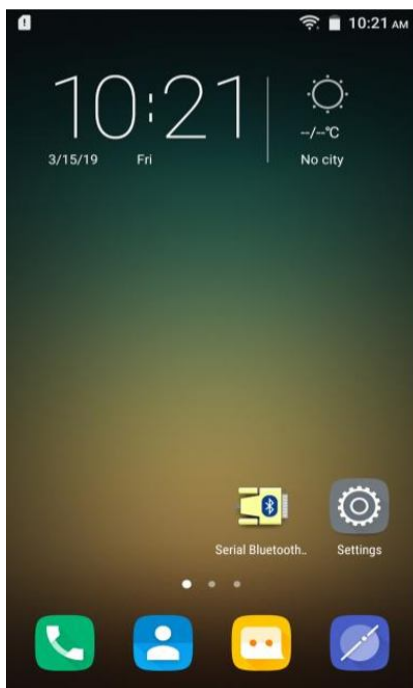


Рис. A1.15. На дисплеї меню вибрати «НАЛАШТУВАННЯ».

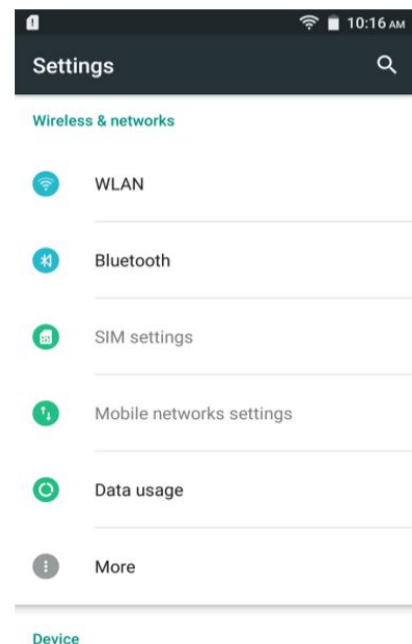


Рис. A1.16. У цьому меню слід вибрати позицію «BLUETOOTH».

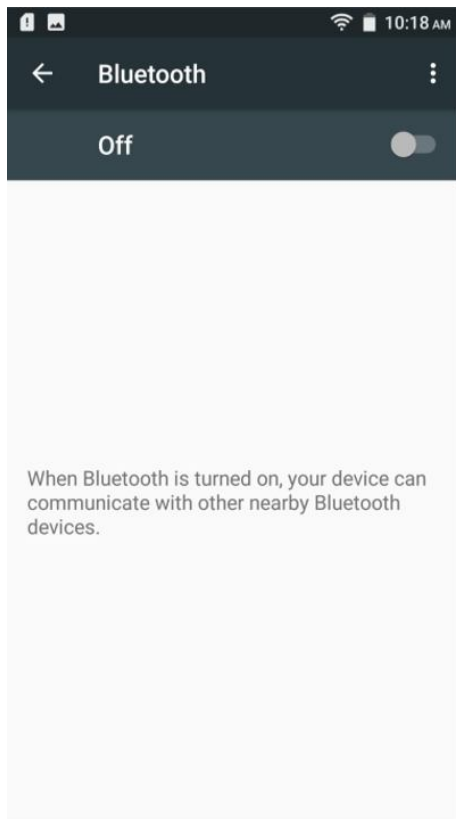


Рис.А1.17. Включаємо «BLUETOOTH». Запуститься пошук пристроїв.

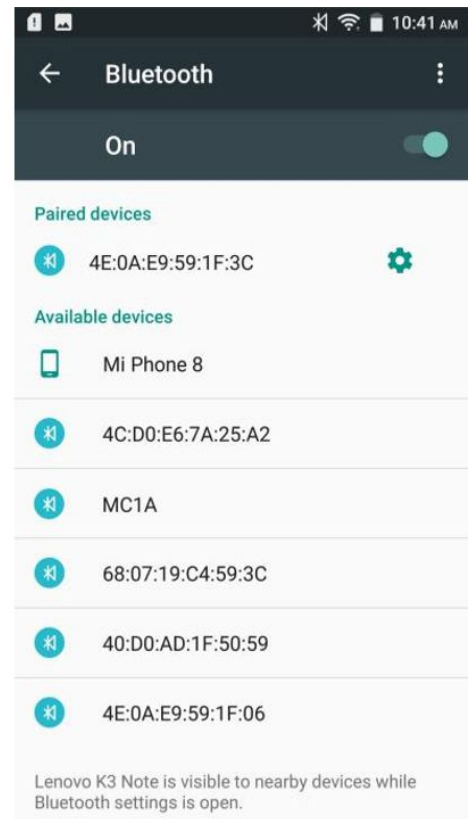


Рис.А1.18. Телефон знайде доступні пристрої. Вибираємо пристрій MC1A (ідентифікатор блоку SKWM-001B).

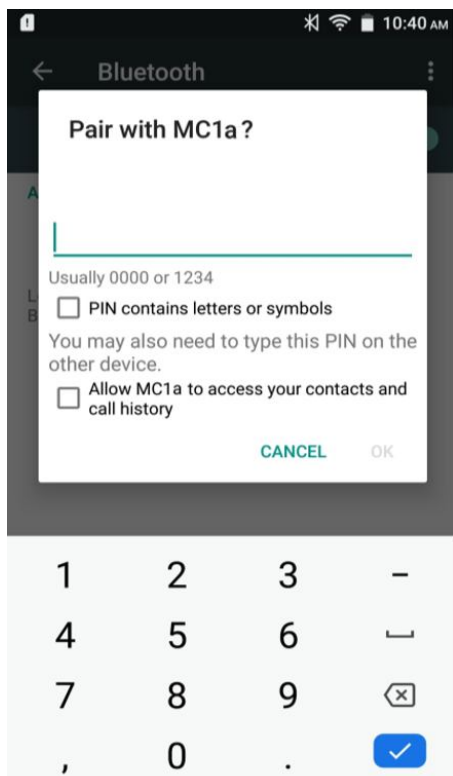


Рис.А1.19. Набираємо пін-код 1234 і натискаємо ОК. Пристрій під'єднано.

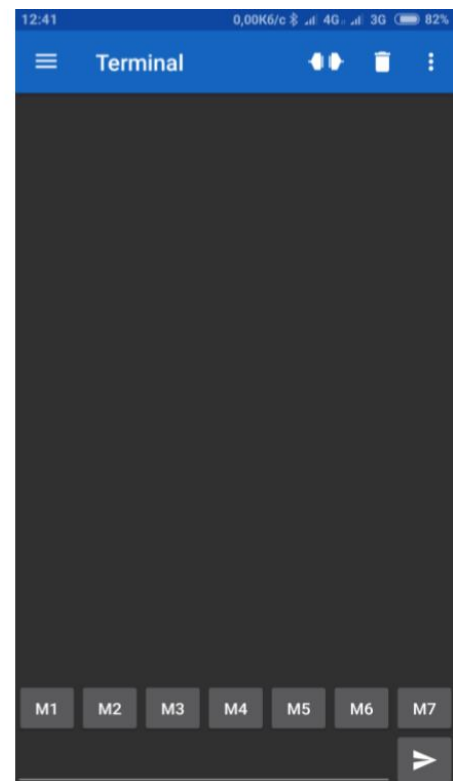


Рис.А1.20. У додатку Serial Bluetooth Terminal натискаємо значок в лівому верхньому кутку екрану.

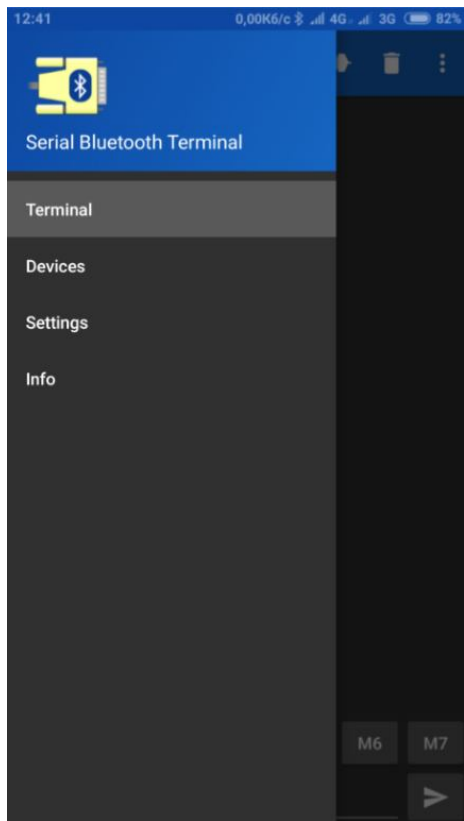


Рис.А1.21. Вибираємо пункт Devices.

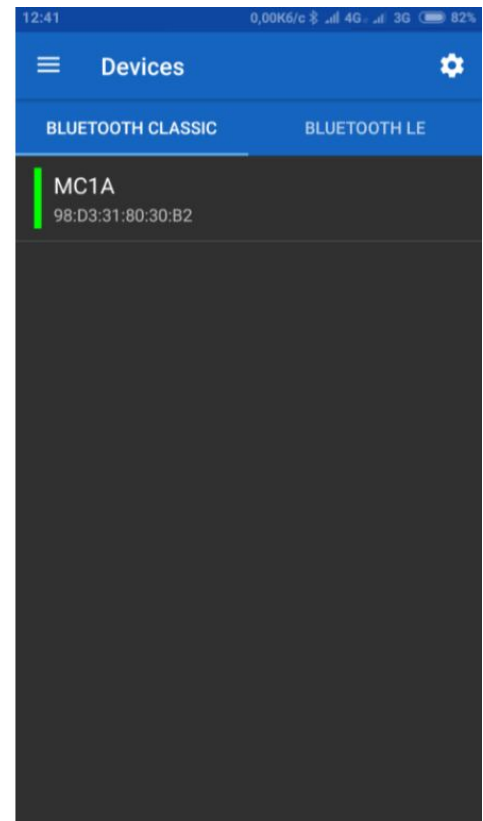


Рис.А1.22. Вибираємо значок MC1A.

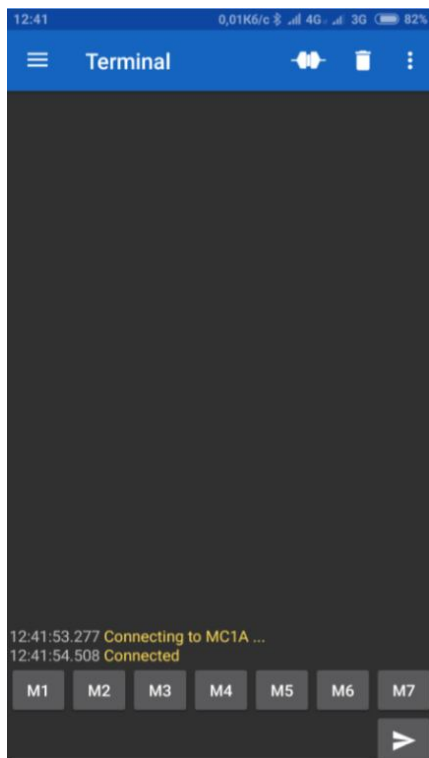


Рис.А1.23. Повертаємося до попереднього меню і натискаємо значок Connect. З'явиться інформація жовтими літерами про з'єднання з SKWM-001B.

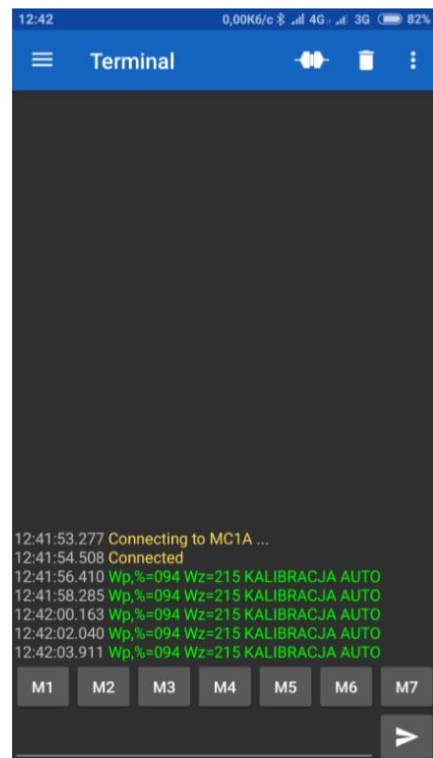


Рис.А1.24. Зеленими літерами з'явиться інформація про рівень завантаженості млина, коефіцієнт підсилення і режим калібрування.

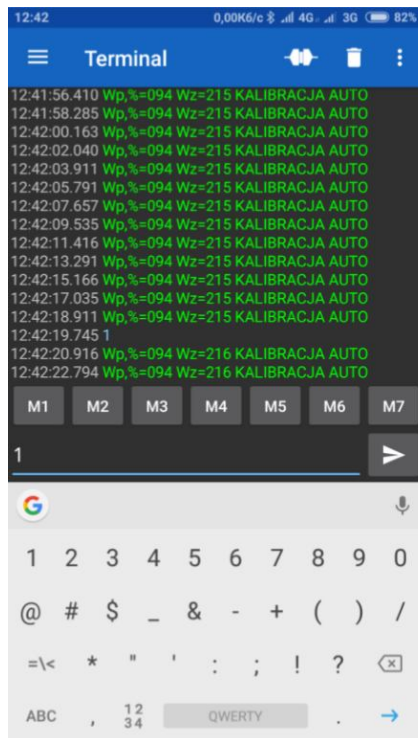


Рис.А1.25. Після введення «1» в правому нижньому кутку коефіцієнт підсилення «WZ» буде збільшений на один пункт (було 215 стало 216).

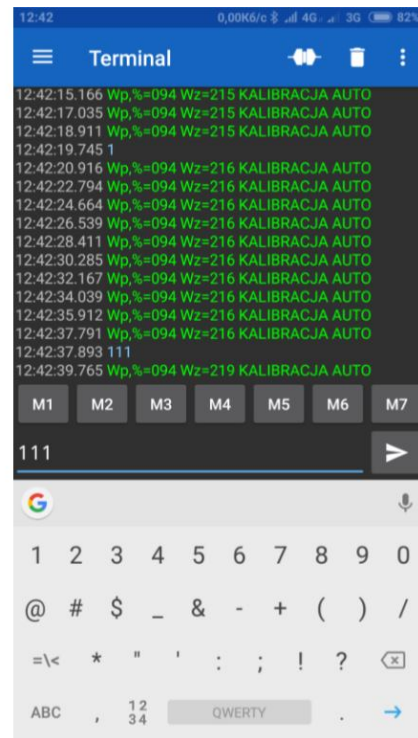


Рис.А1.26. Після введення «111» коефіцієнт підсилення «WZ» буде збільшений на три пункти (було 216 стало 219).

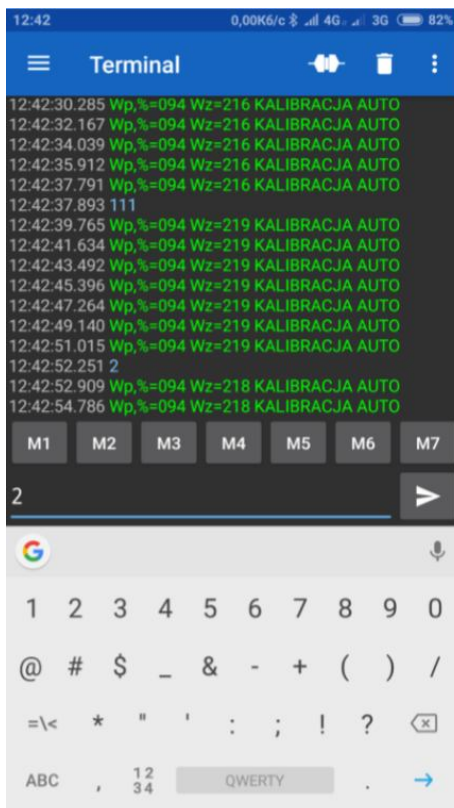


Рис.А1.27. Після введення «2» коефіцієнт підсилення «WZ» зменшиться на один пункт (було 219 стало 218).

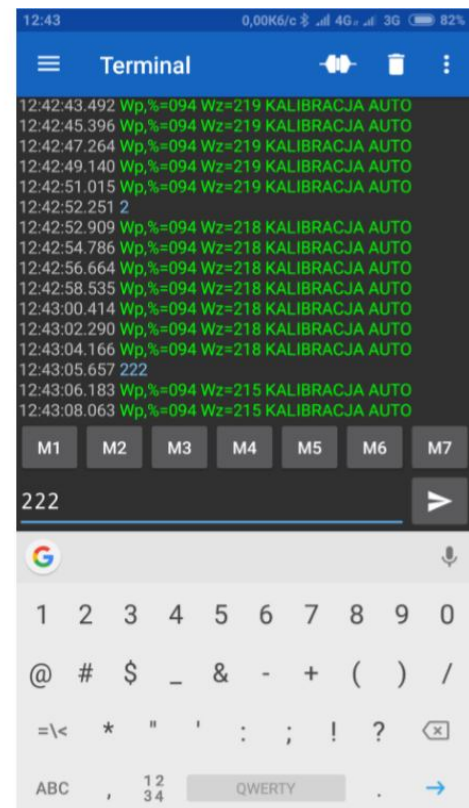


Рис.А1.28. Після введення «222» коефіцієнт підсилення «WZ» зменшиться на три пункти (було 218 стало 215).

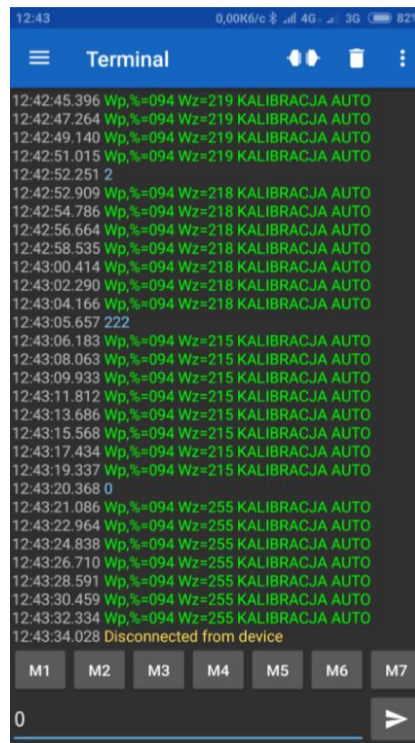


Рис. А1.29. Для встановлення початкового максимального коефіцієнта підсилення «WZ» слід ввести «0». Коефіцієнт підсилення «WZ» буде рівним 255.

Після цього скидання блок SKWM-001В готовий до автоматичного самокалібрування і потрібно тільки вихолостити млин. Ці операції можна також виконати при підключенні GSM модему до блоку SKWM-001. При наявності інтернету і програми TeamViewer на пристрої, підключеному до блоку SKWM-001В, фахівець від виробника може віддалено виконати калібрування блоку SKWM-001В і діагностику млина.

А1.6. Технічні дані СКЗ КБМ

Вимоги до надійності СКЗ КБМ задовольняють ГОСТ 4.191-85 [309]:

Середнє напрацювання на відмову, не менше, годин	25000
Встановлене безвідмовне напрацювання, не менше, годин	15000
Середній термін експлуатації, не менше, років	10
Встановлений термін експлуатації, не менше, роки	4
Середній термін зберігання, не менше, років	5
Середній час відновлення, не більше, годин	6

Технічні дані акселерометра типу АВС:


Верхня межа вимірювальних вібраційних прискорень, m/c^2	3000
Верхня межа вимірювальних ударних прискорень, m/c^2	10000
Робочий діапазон частот, Гц	0,5 – 50000
Опір ізоляції в нормальних умовах, не менше, МОм	100

Технічні дані блоку SKWM-001:

Вхідний опір, не менше, МОм	100±0,15
Смуга пропускання, кГц	0,001 – 50
Вхідна ємність (з врахуванням кабелю і акселерометра), не більше, пФ	2500
Напруга живлення від мережі постійного струму, В	24±10%
Вихідний аналогового струмовий сигнал, мА	4 – 20
Послідовний інтерфейс передачі даних	UART, RS-232

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний директор
Наукового, проектно-виробничого
підприємства ТзОВ «Техприлад»
Р. Я. Дубіль
« 12 » 12 2020 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів, отриманих у дисертаційній роботі докторанта Федоришина Романа Мироновича «Імпульсні регулятори нелінійних систем керування в тепловій енергетиці», представленій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Комісія у складі представників НПВП ТзОВ «Техприлад», директора з виробництва – головного конструктора Прокопця Андрія Богдановича, заступника директора із загальних питань Соколока Сергія Анатолійовича, та представників Національного університету «Львівська політехніка» (НУ«ЛП»), завідувача кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, д.т.н., професора Пістун Євгена Павловича, докторанта Федоришина Романа Мироновича, склали даний акт про те, що НПВП ТзОВ «Техприлад» прийняло до використання та впровадження наступні результати досліджень Федоришина Р. М.:

- алгоритм автоматичного керування роботою кульового барабанного млина для розмелювання вугілля, у якому передбачено автоматичну подачу сирого вугілля у млин та захист за усіма технологічними параметрами, що забезпечує ефективне керування млином із максимальною продуктивністю при змінній якості сирого вугілля;
- моделі для визначення додаткових похибок вимірювання витрати та об'єму природного газу, зумовлених інерційністю термоперетворювача та теплообміном між потоком газу та корпусом лічильника, на основі яких можна виявляти дисбаланси у системах постачання природного газу;
- рекомендації для усунення впливу температурних умов протікання природного газу на точність вимірювання його витрати та об'єму, які забезпечують підвищення точності автоматизованих систем обліку природного газу на теплогенеруючих об'єктах.

Від НПВП ТзОВ «Техприлад»

Від НУ«ЛП»

Директор з виробництва – головний конструктор

Завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, д.т.н., професор

 А. Б. Прокопець

 Є. П. Пістун

Заступник директора із загальних питань

Докторант, к.т.н., доцент

 Є. А. Соколюк

 Р. М. Федоришин



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з науково-педагогічної
роботи Національного університету
«Львівська політехніка»

О. Р. Давидчак

2020 р.

АКТ

про впровадження у навчальний процес наукових результатів дисертаційної роботи доцента кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Федоришина Р. М. «Імпульсні регулятори нелінійних систем керування в тепловій енергетиці», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація процесів керування

Ми, що нижче підписалися, директор інституту енергетики та систем керування, д.т.н., професор Лозинський А. О., завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, д.т.н., професор Пістун Є. П., доцент кафедри АВКТ Крих Г. Б., склали цей акт у тому, що матеріали дисертаційної роботи «Імпульсні регулятори нелінійних систем керування в тепловій енергетиці» Федоришина Романа Мироновича впроваджені у навчальний процес при вивченні дисциплін «Технічні засоби автоматизації», «Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації», «Супервізорні системи керування та збору даних» та «Автоматизація та оптимізація теплоенергетичних процесів» для студентів спеціальності 151 - «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології».

Директор інституту енергетики
та систем керування, д.т.н., професор

А. О. Лозинський

Завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих
технологій, д.т.н., професор

Є. П. Пістун

Доцент кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих
технологій, к.т.н., доцент

Г. Б. Крих

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор науково-виробничого
департаменту АСУ ТП
ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО»

Б.Є. Симкін

2020 р.

АКТ



**про використання в практичній діяльності НВД АСУ ТП ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО»
результатів досліджень докторанта Федоришина Р. М. за темою дисертаційної роботи
«Імпульсні регулятори нелінійних систем керування в тепловій енергетиці»,
представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю
05.13.07 – «Автоматизація процесів керування»**

Комісія, у складі представників НВД АСУ ТП ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО», технічного директора Соколова Олексія Тихоновича, заступника технічного директора Голубця Романа Федоровича, та представників Національного університету «Львівська політехніка» (НУ«ЛП»), завідувача кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, д.т.н., професора Пістун Євгена Павловича, докторанта Федоришина Романа Мироновича, склала цей акт про те, що НВД АСУ ТП ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО» прийняв до використання та впровадження наступні результати досліджень Федоришина Р. М.:

- удосконалений алгоритм широтно-імпульсної модуляції у складі автоматичного регулятора для керування тепловим об'єктом, що забезпечує усунення брязкоту вихідного релейного контакту та підвищення надійності його роботи;

- спосіб вибору періоду імпульсів для ШІМ з врахуванням динамічних властивостей об'єкта регулювання, що забезпечує підвищення надійності функціонування контролера та збільшення часового ресурсу роботи регулюючого органу;

- методику розрахунку оптимального фільтра аналогового вхідного сигналу регулятора на основі інтегрального критерію оптимальності, що забезпечує високу якість процесу фільтрування при незначній динамічній похибці профільтрованого сигналу;

- модель кульового барабанного млина та алгоритм автоматичного керування його роботою, що забезпечує підвищення ефективності процесу розмелювання вугілля на теплових електростанціях при змінній якості сирого вугілля.

Від НВД АСУ ТП ТОВ «ЕМВ-ЕНЕРГО»

Технічний директор НВД АСУ ТП

О.Т. Соколов

Заст. технічного директора НВД АСУ ТП

Р.Ф. Голубець

Від НУ«ЛП»

завідувач кафедри автоматизації та
комп'ютерно-інтегрованих технологій, д.т.н.,
професор

Є.П. Пістун

Докторант, к.т.н., доцент

Р.М. Федоришин

ДОДАТОК Б

Список опублікованих 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, Editor B. Katalinic, 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, Editor B. Katalinic, 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/jeeecs2016.02.069>
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/jeeecs2017.02.063>
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/jeeecs2018.02.093>
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 доквілля. 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/jeeecs2016.01.009>
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 доквілля. 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 доквілля. 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 доквілля. 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.

Тези доповідей на наукових конференціях, симпозиумах та семінарах:

35. Pistun Ye., Zahray V. and Fedoryshyn R. Controller-optimizer of ball mill performance // Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2011” – Львів 28-30.09.2011. – с. 406-407
36. Пістун Є.П., Заграй В.С., Николин Г.А., Федоришин Р.М. Регулятор-оптимізатор роботи кульового барабанного млина // Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 24-25 квітня 2012 р., Київ. – с. 251-252
37. Y. Pistun, V. Zahray, H. Nykolyn and R. Fedoryshyn. Improvement of a ball mill automation and optimization system // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2012” – Київ 26-28.09.2012. – с. 242-243

38. Хімко Н. І., Федоришин Р. М. Математична модель кульового барабанного млина // Матеріали III Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології – 2013”. – Київ. – 2013. – С. 32-33.
39. Федоришин Р. М., Савицький В. К., Кльось С. Р. Схеми автоматичних регуляторів та їх класифікація // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 16-17 травня 2017 р., Київ. – с. 160-161
40. Федоришин Р. М., Савицький В. К., Кльось С. Р. Схеми імпульсних ПІД регуляторів // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 17-18 травня 2016 р., Київ. – с. 195-196
41. Fedoryshyn R., Savytskyi V., Klyos S. Experimental Study of an Electric Oven and Development of Its Mathematical Model // Proceedings of IX Annual Scientific Conference “Information Technologies and Automation – 2016”, Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 20-21.
42. Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos, Volodymyr Savytskyi. Development of Mathematical Model of Controlled Plant Using the Obtained Experimental Data // Proceedings of 6th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 24-26.11.2016. – p. 189-190.
43. Федоришин Р. М., Кльось С. Р. Побудова математичної моделі теплового об’єкту на основі отриманих експериментальних даних // Збірник тез доповідей 74-ї Студентської науково-технічної конференції, присвяченої 200-річчю з дня заснування Львівської політехніки, жовтень 2016 р., електронний опт. диск (CD-ROM), Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2016. – с. 94-95.
44. Roman Fedoryshyn, Sviatoslav Klos. Analysis of Pulse-Width Modulation Methods // Proceedings of 7th International Youth Science Forum “Litteris et Artibus”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 23-25.11.2017. – p. 170-171.
45. Fedoryshyn R. M., Savytskyi V. K., Pistun Y. P., Klos S. R. Application of pulse-width modulator for thermal plant control // Матеріали XXV міжнародної конференції з автоматичного управління “АВТОМАТИКА/AUTOMATICS - 2018” – Львів 18-19.09.2018. – с. 161-162.
46. Sviatoslav Klos, Oleh Svyryd, Roman Fedoryshyn. Optimization of analog signal filtration process // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 129-130.
47. Федоришин Р., Грень Я., Матіко Ф. Аналіз причин появи похибок вимірювання витрати природного газу, зумовлених змінами параметрів нестационарного потоку // Матеріали I Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2009. – Львів. – 2009. – С. 73-74.
48. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Костик І. В. Дослідження резонансних явищ в імпульсних трубках витратомірів // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 21.
49. Костик І. В., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Дослідження резонансних явищ у пневматичних лініях вимірювальних перетворювачів систем обліку газу // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2013 р., Київ. – с. 252-253.
50. R. Fedoryshyn, F. Matiko, I. Kostyk and Y. Pistun. Systematic Error of Gas Flow Rate Measurement Caused by Flow Pulsation // Proceedings of 9th International Symposium on Fluid Flow Measurement, April 14-17, 2015, CDROM version, pp.1-12, Arlington, Virginia, USA.
51. I. Kostyk, F. Matiko, R. Fedoryshyn. Effect of Flow Pulsations on the Accuracy of Differential Pressure Flowmeters // Proceedings of Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015”, September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-8, Warsaw, Poland.

52. Roman Fedoryshyn, Fedir Matiko, Ihor Kostyk, Khrystyna Stefurak. Mathematical Modeling and Experimental Study of Impulse Lines of Flowmeters // Proceedings of 5th International Youth Science Forum "Litteris et Artibus". Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 26-28.11.2015. –p. 178-179.
53. Костик І. В., Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д. Моделювання пневматичних ліній вимірювальних перетворювачів тиску // Збірник тез доповідей XV Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи", НТУУ"КПІ", 17-18 травня 2016 р., Київ. – с. 203-204.
54. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Розроблення алгоритму розрахунку теплопровідності природного газу з метою уточнення впливу теплообмінних процесів на точність його обліку // Збірник праць 5-ї міжнародної науково-практичної конференції "Проблеми економії енергії". - Львів. - 2008. - С. 39-42.
55. Федоришин Р. М., Комарецький О. А. Вплив інерційності термоперетворювача на точність вузла обліку природного газу в імпульсних режимах роботи // Збірник тез доповідей XII Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи", НТУУ"КПІ", 23-24 квітня 2013 р., Київ. – с. 256-257.
56. Федоришин Р., Комарецький О., Чура М. Математичне моделювання температурного режиму потоку газу в системах його обліку при імпульсних режимах роботи // Матеріали IV Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2013. Наукове електронне видання на CD-ROM – Львів. – 21-23.11.2013. –С. 58-61.
57. Федоришин Р., Комарецький О., Чура М. Моделювання імпульсних режимів роботи системи автоматизованого обліку природного газу // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Наукове електронне видання. Випуск № 1, 2014 р. – С. 250-256.
58. Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Власюк Я. М., Ярошевич В. М. Динамічна похибка вимірювання температури природного газу внаслідок інерційності термоперетворювача // Збірник тез доповідей XVI Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи", НТУУ"КПІ", 16-17 травня 2017 р., Київ. – с. 186-187.
59. Федоришин Р. М., Пістун О. І. Моделювання похибки вимірювання об'єму природного газу для імпульсного режиму потоку в системі обліку // Збірка тез тринадцятої міжнародної науково-практичної конференції "Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2020)", Київ, 19-20 травня 2020 р. – К: НАУ, 2020. – С. 145–147.
60. Федоришин Р. М., Брилинський Р. Б., Масняк О. Я., Пістун О. І. Вплив імпульсного режиму потоку природного газу на точність його обліку // Матеріали IV-тої всеукраїнської науково-практичної конференції "Приладобудування та метрологія: сучасні проблеми, тенденції розвитку", Луцьк, 29-30 жовтня 2020 р. – Луцький НТУ, 2020. – С. 88–89.
61. Roman Fedoryshyn. Improvement of accuracy of natural gas flow rate measurement by means of orifice plates in gas heating systems // Papers of 5th Students' Scientific Conference "Man – Civilization – Future". Vol. 2. Wroclaw – 2007. - P. 137-145
62. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Побудова витратомірів газу, інваріантних до температурних змін потоку // Збірник тез доповідей п'ятої всеукраїнської науково-технічної конференції "Вимірювання витрати та кількості газу". - Івано-Франківськ. - 2007. - С. 17-18.
63. Федоришин Р., Матіко Ф. Вплив теплообміну між гільзою термоперетворювача та трубопроводом на точність вимірювання температури природного газу в системах його обліку // Матеріали II Міжнародної конференції молодих вчених EPECS-2010. – Львів. – 2010. – С. 22-23.
64. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Крук С.Ю. Вплив теплообмінних процесів на похибку вимірювання витрати та об'єму з допомогою лічильників газу // Збірник тез доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції "Приладобудування: стан і перспективи", НТУУ"КПІ", 24-25 квітня 2012 р., Київ. – с. 244-245

65. Ye. Pistun, F. Matiko and R. Fedoryshyn. Additional Error of Flow Temperature Measurement and Its Influence on the Accuracy of Fluid Flowrate and Volume Measurement // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-18, Colorado Springs, Colorado, USA.
66. Федоришин Р. М., Демчишин І. Б. Теплообмін між гільзою термоперетворювача та стінкою трубопроводу в системах обліку природного газу // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції “Приладобудування: стан і перспективи”, НТУУ“КПІ”, 23-24 квітня 2014 р., Київ. – с. 223-224
67. Федоришин Р. М., Чура М. В., Мот В. Р. Теплообмін між потоком газу та корпусом роторного лічильника в автоматизованій системі комерційного обліку природного газу // Матеріали Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». Наукове електронне видання. Випуск № 2, 2014 р. – С. 37-42.
68. Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Аналіз додаткової систематичної похибки вимірювання температури потоку природного газу в системах його обліку // Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України “Облік природного газу та метрологія”, 13-17.03.2017 р., Львів. – с. 20-21.
69. Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Пістун Є. П. Особливості вимірювання температури потоку природного газу в системах його обліку // Збірник тез доповідей 4-ої Міжнародної наукової конференції “Вимірювання, контроль та діагностика в технічних системах”, ВНТУ, 31.10–2.11.2017 р., Вінниця. – с. 238.
70. Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д., Пістун Є. П., Зубко Т. О. Аналіз та розрахунок температурних умов роботи побутових лічильників газу // Збірник матеріалів доповідей 8-ої Міжнародної науково-технічної конференції пам’яті професора Ігоря Кісіля “Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання”, ІФНТУ нафти і газу, 14–16.11.2017 р., Івано-Франківськ. – с. 95-97
71. Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М. Основні засади виконання аудиту систем обліку природного газу // Матеріали I Міжнародного конгресу “Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування”. – Львів. – 2009. – С. 127-128.
72. Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Удосконалення методики проектування теплоізоляції витратомірів газу // Збірник тез доповідей шостої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2009. - С. 85-86.
73. R. Fedoryshyn, F. Matiko and Ye. Pistun. Influence of heat exchange processes on the accuracy of natural gas volume measurement // Papers of The 15th VDE/ITG/GMA Conference “Sensors and Measuring Systems 2010”. Nuremberg, Germany – 2010. – p. 597-601.
74. Є.П. Пістун, Ф.Д. Матіко, Р.М. Федоришин, Я.М. Власюк, В.М. Ярошевич Дослідження додаткових похибок вимірювання температури та об’єму природного газу в системах його обліку // Матеріали VII міжнародної науково-технічної конференції “Метрологія та вимірювальна техніка”. Том 2 - Харків. - 2010. - С. 192-195.
75. Федоришин Р., Матіко Ф. Методика виконання експертизи систем обліку енергоносіїв з метою підвищення їх точності // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених, студентів та аспірантів Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології - 2011. – Київ. – 2011. – С. 59-60.
76. Рябцев Г., Федоришин Р., Матіко Ф. Розробка спрощеної методики розрахунку коефіцієнта стисливості коксового газу // Матеріали III Міжнародної конференції молодих вчених ERECS-2011. – Львів. – 2011. – С. 18-19.
77. Пістун Є.П., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М. Попередні результати впровадження нових комплексів стандартів ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2005 і ДСТУ ГОСТ 8.586.1,2,3,4,5-2009 в Україні // Збірник тез доповідей сьомої всеукраїнської науково-технічної конференції “Вимірювання витрати та кількості газу”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 7.

78. Рябцев Г., Федоришин Р., Матіко Ф. Спрощена методика розрахунку коефіцієнта стисливості енерговмісних сумішей газів // Збірник тез доповідей 3-тньої науково-практичної конференції студентів і молодих учених “Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання”. - Івано-Франківськ. - 2011. - С. 133-134.
79. В. Роман, Ф. Матіко, Р. Федоришин. Методи визначення швидкості звуку в природному газі для вимірювання його витрати // Матеріали XIX міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика / Automatics - 2012” – Київ 26-28.09.2012. – с. 436-437.
80. Ye. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn. “Raskhod-RU” CAD System for Computer Aided Design of Flowmeters for Fluid Energy Carriers // Proceedings of 8th International Symposium on Fluid Flow Measurement, June 20-22, 2012, CDROM version, pp.1-11, Colorado Springs, Colorado, USA.
81. Y. Pistun, L. Lesovoy and R. Fedoryshyn. New CAD system for designing the pressure differential flowmeters // Papers of The 16th International Conference on Sensors and Measurement Technology “SENSOR 2013”. Nuremberg, Germany – 2013. – p. 700-705.
82. Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Матіко Ф. Д. Інтегрування сигналу витрати газу в турбінних лічильниках // Матеріали XXI міжнародної конференції з автоматичного управління “АВТОМАТИКА - 2014” – Київ 23-27.09.2014. – с. 168-169.
83. R. Fedoryshyn, Y. Pistun, F. Matiko, V. Roman. Improvement of Mathematical Model of Ultrasonic Flowmeter for Studying Its Errors in Disturbed Flows // Proceedings of Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF’15), Budapest, Hungary, September 01-04, 2015, pp.1-7.
84. V. Roman, F. Matiko, R. Fedoryshyn. CFD Simulation and Experimental Study of Ultrasonic Flowmeters // Proceedings of Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology 2015”, September 21-23, 2015, CDROM version, pp.1-6, Warsaw, Poland.
85. Matiko F. D., Roman V. I., Fedoryshyn R. M., Pistun Y. P. Methodology of improvement of ultrasonic flowmeter mathematical model for studying its additional errors // Proceedings of IX Annual Scientific Conference “Information Technologies and Automation – 2016”, Odessa National Academy of Food Technologies, October, 11-16, 2016, Odessa. – p. 16-17.
86. Пістун Є.П., Матіко Ф.Д., Федоришин Р.М., Крук С.Ю. Особливості визначення коефіцієнта стисливості природного газу для систем його обліку // Всеукраїнська семінар-нарада НАК Нафтогаз України “Облік природного газу та метрологія”, 13-17.03.2017 р., Львів. – с. 11-14
87. Федоришин Р. М., Дичук П. В. Автоматизований розрахунок похибок вимірювання температури газу // Збірник тез доповідей 76-ї Студентської науково-технічної конференції, жовтень 2018 р., електронний опт. диск (CD-ROM), Львів: Вид-во Львівської політехніки, 2018. – с. 98-100.
88. Petro Dychuk, Roman Fedoryshyn. Computer-aided design of gas flow temperature measurement errors // Proceedings of 8th International Joint Youth Science Forum “Litteris et Artibus” & 13th International Conference “Young Scientists Towards the Challenges of Modern Technology”. Electronic edition on CD-ROM. – Lviv. – 22-24.11.2018. – p. 135-137.
89. Матіко Ф. Д., Пістун Є. П., Федоришин Р. М., Масняк О. Я. Методики визначення обсягів дійсних втрат газу в газорозподільних мережах // Збірник тез доповідей Всеукраїнського семінару-наради “Приладовий облік природного газу, його нормативно-правове та метрологічне забезпечення” (Запоріжжя, 27-31 травня 2019 р.). – 2019. – С. 20–23.

Патенти:

90. Пістун Є. П., Матіко Ф. Д., Федоришин Р. М., Мінін С. В. “Спосіб калібрування побутових лічильників газу”, патент України на корисну модель № 95014 від 10.12.2014 р., бюл. № 23, 2014.
91. Матіко Ф. Д., Пістун О. І., Федоришин Р. М. “Спосіб вимірювання об’єму газу, зведеного до стандартних умов”, патент України на корисну модель № 134376 від 10.05.2019 р., бюл. № 9, 2019.