

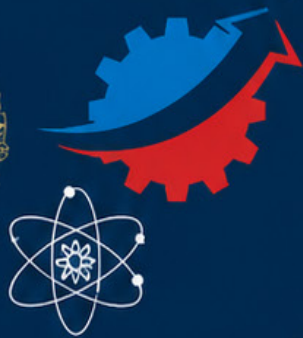
MUHANDISLIK

& IQTISODIYOT

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

2026-YIL

IYUL/7-SON, I-QISM



Milliy nashrlar

OAK: <https://oak.uz/pages/4802>

05.00.00 - Texnika fanlari

08.00.00 - Iqtisodiyot fanlar



ISSN: 3060-463X



muhandislik **& iqtisodiyot**

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Elektron nashr, 2026-yil, iyul.

Bosh muharrir:

Zokirova Nodira Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, DSc, professor

Bosh muharrir o'rinbosari:

Shakarov Zafar G'afrovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori, PhD, dotsent

Tahrir hay'ati:

Abduraxmanov Kalendar Xodjayevich, O'z FA akademigi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Sharipov Kongratbay Avezimbetovich, texnika fanlari doktori, professor

Maxkamov Baxtiyor Shuxratovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Abduraxmanova Gulnora Kalandarovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shaumarov Said Sanatovich, texnika fanlari doktori, professor

Turayev Bahodir Xatamovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Nasimov Dilmurod Abdulloyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Allayeva Gulchexra Jalgasovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Arabov Nurali Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Maxmudov Odiljon Xolmirzayevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Xamrayeva Sayyora Nasimovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bobonazarova Jamila Xolmurodovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Irmatova Aziza Baxromovna, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Bo'taboyev Mahammadjon To'ychiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori, professor

Shamshiyeva Nargizaxon Nosirxuja kizi, iqtisodiyot fanlari doktori, professor,

Xolmuxamedov Muhsinjon Murodullayevich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Xodjayeva Nodiraxon Abdurashidovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Amanov Otabek Amankulovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Toxirov Jaloliddin Ochil o'g'li, texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Qurbonov Samandar Pulatovich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Zikriyoyev Aziz Sadulloyevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tabayev Azamat Zaripbayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sxay Lana Aleksandrovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Ismoilova Gulnora Fayzullayevna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Djumaniyazov Umrbek Ilxamovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kasimova Nargiza Sabitdjanovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi, dotsent

Kalanova Moxigul Baxritdinovna, dotsent

Ashurzoda Luiza Muxtarovna, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sharipov Sardor Begmaxmat o'g'li, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Tursunov Ulug'bek Sativoldiyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), dotsent

Bauyetdinov Majit Janizaqovich, Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti dotsenti, PhD

Botirov Bozorbek Musurmon o'g'li, Texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Sultonov Shavkatjon Abdullayevich, Kimyo fanlari doktori, (DSc)

Jo'raeva Malohat Muhammadovna, filologiya fanlari doktori (DSc), professor.

Yusupov Maxamadamin Abduxamidovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi (DSc), professor

Kalonova Moxigul Baxritdinovna, iqtisodiyot fanlari nomzodi (PhD), dotsent

Mirzayev Kulmamat Djanzakovich, iqtisodiyot fanlari nomzodi (DSc), professor.

Karimova Nilufar Sadirdin qizi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Norboyev Odil Abrayevich, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent

Nasimov Dilmurod Abdulloyevich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Mirzayev Kulmamat Djanzakovich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Karimova Nilufar Sadirdin qizi, iqtisodiyot fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)

Pardaev Umidjon Uralovich, iqtisodiyot fanlari doktori (DSc), professor

Xolmirzayev Ulug'bek Abdulazizovich, Iqtisodiyot fanlari doktori (DSc)

muhandislik & iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

- 05.01.00 – Axborot texnologiyalari, boshqaruv va kompyuter grafikasi
- 05.01.01 – Muhandislik geometriyasi va kompyuter grafikasi. Audio va video texnologiyalari
- 05.01.02 – Tizimli tahlil, boshqaruv va axborotni qayta ishlash
- 05.01.03 – Informatikaning nazariy asoslari
- 05.01.04 – Hisoblash mashinalari, majmualari va kompyuter tarmoqlarining matematik va dasturiy ta'minoti
- 05.01.05 – Axborotlarni himoyalash usullari va tizimlari. Axborot xavfsizligi
- 05.01.06 – Hisoblash texnikasi va boshqaruv tizimlarining elementlari va qurilmalari
- 05.01.07 – Matematik modellashtirish
- 05.01.11 – Raqamli texnologiyalar va sun'iy intellekt
- 05.02.00 – Mashinasozlik va mashinashunoslik
- 05.02.08 – Yer usti majmualari va uchish apparatlari
- 05.03.02 – Metrologiya va metrologiya ta'minoti
- 05.04.01 – Telekommunikatsiya va kompyuter tizimlari, telekommunikatsiya tarmoqlari va qurilmalari. Axborotlarni taqsimlash
- 05.05.03 – Yorug'lik texnikasi. Maxsus yoritish texnologiyasi
- 05.05.05 – Issiqlik texnikasining nazariy asoslari
- 05.05.06 – Qayta tiklanadigan energiya turlari asosidagi energiya qurilmalari
- 05.06.01 – To'qimachilik va yengil sanoat ishlab chiqarishlari materialshunosligi
- 05.08.03 – Temir yo'l transportini ishlatish
- 05.08.06 – "G'ildirakli va gusenisali mashinalar va ularni ishlatish" (texnika fanlari)
- 05.09.01 – Qurilish konstruksiyalari, bino va inshootlar
- 05.09.04 – Suv ta'minoti. Kanalizatsiya. Suv havzalarini muhofazalovchi qurilish tizimlari
- 10.00.06 – Qiyosiy adabiyotshunoslik, chog'ishtirma tilshunoslik va tarjimashunoslik
- 10.00.04 – Yevropa, Amerika va Avstraliya xalqlari tili va adabiyoti
- 08.00.01 – Iqtisodiyot nazariyasi
- 08.00.02 – Makroiqtisodiyot
- 08.00.03 – Sanoat iqtisodiyoti
- 08.00.04 – Qishloq xo'jaligi iqtisodiyoti
- 08.00.05 – Xizmat ko'rsatish tarmoqlari iqtisodiyoti
- 08.00.06 – Ekonometrika va statistika
- 08.00.07 – Moliya, pul muomalasi va kredit
- 08.00.08 – Buxgalteriya hisobi, iqtisodiy tahlil va audit
- 08.00.09 – Jahon iqtisodiyoti
- 08.00.10 – Demografiya. Mehnat iqtisodiyoti
- 08.00.11 – Marketing
- 08.00.12 – Mintaqaviy iqtisodiyot
- 08.00.13 – Menejment
- 08.00.14 – Iqtisodiyotda axborot tizimlari va texnologiyalari
- 08.00.15 – Tadbirkorlik va kichik biznes iqtisodiyoti
- 08.00.16 – Raqamli iqtisodiyot va xalqaro raqamli integratsiya
- 08.00.17 – Turizm va mehmonxona faoliyati

Ma'lumot uchun, OAK
Rayosatining 2024-yil 28-avgustdagi 360/5-son qarori bilan "Dissertatsiyalar asosiy ilmiy natijalarini chop etishga tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro'yxati"ga texnika va iqtisodiyot fanlari bo'yicha "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali ro'yxatga kiritilgan.

Muassis: "Tadbirkor va ishbilarmon" MChJ

Hamkorlarimiz:

1. Toshkent shahridagi G.V.Plexanov nomidagi Rossiya iqtisodiyot universiteti
2. Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti
3. Toshkent irrigatsiya va qishloq xo'jaligini mexanizatsiyalash muhandislari instituti" milliy tadqiqot universiteti
4. Islom Karimov nomidagi Toshkent davlat texnika universiteti
5. Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti
6. Toshkent davlat transport universiteti
7. Toshkent arxitektura-qurilish universiteti
8. Toshkent kimyo-texnologiya universiteti
9. Jizzax politexnika instituti



MUNDARIJA

MILLIY GVARDIYA TIZIMIDA HARBIY XIZMATCHILARNI KIYIM-KECHAK BILAN TA'MINLASH TIZIMINING NAZARIY ASOSLARI	10
Omonov Usmonqul Raxmonqul o'g'li	
FOND BOZORLARIGA XORIJIY KAPITALNI JALB QILISH: ZAMONAVIY YONDASHUVLAR VA RIVOJLANISH IMKONIYATLARI	17
Yusupova Jamila Karamatdinovna	
AXBOROT KOMMUNIKATSIYA XIZMATLARINING TASHKLIY-HUQUQIY VA ILMIY NAZARIY MASALALARI	21
Rajaboyev Shahboz Shodi o'g'li	
PUL MABLAG'LARI HISOBINI MOLIYAVIY HISOBOTNING XALQARO STANDARTLARIGA O'TKAZISHNING DOLZARB MASALALARI	26
Eshonqulov Akmal Qudratovich	
XORAZM VILOYATINING IJOBIY IMIJINI OSHIRISHDA HUDUDIY MARKETING STRATEGIYALARINI ISHLAB CHIQUISH	34
Ibadullayev Dilshad Ibragimovich	
OROL BO'YI MINTAQASIDA QISHLOQ XO'JALIGI VA TURIZMNI YASHIL MOLIYALASHTIRISH VA INVESTITSIYA MEXANIZMLARI: BARQAROR RIVOJLANISH ISTIQBOLLARI	40
Akramova Feruza	
ATMOSFERA HAVOSI MONITORINGIDA IOT SENSORLARI O'LCHASH NATIJALARINING METROLOGIK ISHONCHLILIGINI BAHOLASH VA OSHIRISH METODOLOGIYASINI TAKOMILLASHTIRISH	52
Sobirov Anvarjon, Melibayev Maxmudjan	
BANK VA KREDIT MUASSASALARINING RIVOJLANISH TENDENSIYALARINI TREND MODELARI YORDAMIDA TAHLIL QILISH VA PROGNOZLASH USULLARI	59
Nazarov Elbek	
"O'ZBEKISTON MILLIY ELEKTR TARMOQLARI" AJ ENERGETIKA TIZIMINING HUDUDIY RIVOJLANISH YO'NALISHLARI	66
Xakimjanova Surayyo Xabibullayevna	
ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА РАЗВИТИЯ ЗОН КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В МАССИВЕ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЛИЯНИИ ПРОЦЕССОВ ДОБЫЧИ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА «КЫЗЫЛ-АЛМА»	70
Салямова Клара, Меликулов Абдусаттар, Уралбаев Абдукахар, Бакиров Гайрат, Зухритдинов Давронбек	
XUSUSIY TA'LIM SOHASIDA MALAKALI KADRLAR NOMUTANOSIBLIGI, IT MUTAXASSISLARINING YETISHMASLIGI VA ISHSIZLIKNING TA'LIM SIFATI HAMDA BARQARORLIGIGA TA'SIRI: ILG'OR XORIJ TAJRIBASI VA UNING O'ZBEKISTON AMALIYOTIGA TATBIQ ETILISHI	77
Raxmatxo'jayev Axrolxo'ja Akmal o'g'li	
SAND-PARTICLE-INDUCED LEADING-EDGE EROSION AND ITS IMPACT ON WIND TURBINE BLADES: A REVIEW	82
Normamatov A. A.	
ИПАКЧИЛИК КЛАСТЕРЛАРИ UCHUN INVESTITSION BOSHQARUV MODELINI ASOSLASH	87
Elboyeva Shaxzoda Olimovna	
KICHIK VA O'RTA BIZNES SAMARADORLIGINI EKONOMETRIK USULLARDA TAHLIL QILISH METODOLOGIYASI	94
Nazarov Nazar G'ulom o'g'li	
OLIV TA'LIM MUASSASALARI BOSHQARUV FAOLIYATINI RAQAMLASHTIRISHNING AHAMIYATI	101
Usmanov Sarvar Nigmatovich	



РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО МНОГОЗОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ FUZZY-PID ДЛЯ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ УВЛАЖНЕНИЯ
ЗЕРНА..... 107
Камариддинов Шохрух Акмал угли



РАЗРАБОТКА АДАПТИВНОГО МНОГОЗОНАЛЬНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ FUZZY-PID ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В ПРОЦЕССЕ УВЛАЖНЕНИЯ ЗЕРНА

Камариддинов Шохрух Акмал угли

Бухарский государственный технический университет

Соискатель учёной степени PhD

E-mail: shoxrux.qamariddinov97@gmail.com

Аннотация: В данной статье предлагается адаптивный многозональный алгоритм управления Fuzzy-PID, разработанный для обеспечения стабильного и равномерного распределения влажности в процессе паровой сорбционной обработки зернового сырья. Отличительная особенность системы — разделение технологического процесса вдоль шнекового конвейера на четыре независимые зоны управления, в каждой из которых реализован локальный регулятор Fuzzy-PID с учётом межзональных взаимодействий. На основе фильтра Калмана в каждой зоне осуществляется краткосрочное прогнозирование вариаций влажности, что компенсирует инерционные задержки и повышает быстродействие регулятора. Адаптивная подача пара оптимизируется с учётом давления и расхода зерна. Дополнительно в систему интегрирован модуль объяснимого ИИ (XAI), интерпретирующий каждое решение регулятора для оператора. Предлагаемый подход обоснован теоретически и верифицирован в среде MATLAB/Simulink. Результаты показывают снижение средней ошибки влажности до $\pm 0.38\%$ и экономию расхода пара на 13.3% по сравнению с классическим PID-управлением.

Ключевые слова: многозональное управление, адаптивный Fuzzy-PID, фильтр Калмана, паровое увлажнение, пространственная равномерность, объяснимый ИИ (XAI), обработка зерна.

Annotatsiya: Ushbu maqolada don xomashyosini bug'li sorbsion ishlov berish jarayonida namlikning barqaror va bir tekis taqsimlanishini ta'minlash uchun mo'ljallangan adaptiv ko'p zonali Fuzzy-PID boshqaruv algoritmi taklif etilgan. Tizimning asosiy xususiyati texnologik jarayonni shnekli konveyer bo'ylab to'rtta mustaqil boshqaruv zonasiga ajratishdan iborat bo'lib, har bir zonada zonalararo o'zaro ta'sirlarni hisobga oluvchi lokal Fuzzy-PID regulyatori qo'llanilgan. Har bir zonada Kalman filtri asosida namlik o'zgarishlarining qisqa muddatli prognozi amalga oshirilib, jarayonning inertsiya kechikishlari kompensatsiya qilinadi va regulyatorning tezkorligi oshiriladi. Adaptiv bug' uzatish bug' bosimi va don oqimi sarfini hisobga olgan holda optimallashtiriladi. Bundan tashqari, tizimga operator uchun regulyatorning har bir qarorini izohlovchi tushuntiriladigan sun'iy intellekt (XAI) moduli integratsiya qilingan. Taklif etilgan yondashuv nazariy jihatdan asoslangan hamda MATLAB/Simulink muhitida verifikatsiya qilingan. Natijalar klassik PID boshqaruviga nisbatan namlikning o'rtacha xatoligini $\pm 0,38\%$ gacha kamaytirish va bug' sarfini $13,3\%$ ga tejash imkonini berishini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: ko'p zonali boshqaruv, adaptiv Fuzzy-PID, Kalman filtri, bug' bilan namlash, fazoviy bir tekislik, tushuntiriladigan sun'iy intellekt (XAI), donni qayta ishlash.

Abstract: This paper proposes an adaptive multi-zone Fuzzy-PID control algorithm designed to ensure stable and uniform moisture distribution during the steam sorption treatment of grain materials. The distinguishing feature of the system is the division of the technological process along the screw conveyor into four independent control zones, each equipped with a local Fuzzy-PID controller that accounts for inter-zone interactions. A Kalman filter is employed in each zone to perform short-term prediction of moisture variations, compensating for process inertia and improving controller responsiveness. The adaptive steam supply is optimized based on steam pressure and grain flow rate. In addition, an Explainable Artificial Intelligence (XAI) module is integrated into the system to interpret each control decision for the operator. The proposed approach is theoretically substantiated and validated in the MATLAB/Simulink environment. The simulation results demonstrate a reduction in the average moisture error to $\pm 0.38\%$ and a 13.3% decrease in steam consumption compared with the conventional PID control approach.

Keywords: multi-zone control, adaptive Fuzzy-PID, Kalman filter, steam humidification, spatial uniformity, Explainable Artificial Intelligence (XAI), grain processing.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение равномерного увлажнения зерна является одной из ключевых технологических задач в мукомольном и зернообработывающем производстве. Неравномерное распределение влаги по длине шнекового конвейера ведёт к нестабильности качества конечного продукта: недоувлажнённые партии снижают выход муки, тогда как переувлажнённые создают риски порчи и плесневения [1]. Классические PID-регуляторы, широко применяемые для контроля сушки и увлажнения, демонстрируют ограниченную эффективность в условиях значительной инерционности процесса: задержка проявления управляющего воздействия составляет 10–42 с, что приводит к перерегулированию и колебаниям [2].

Применение гибридных Fuzzy-PID-регуляторов позволяет существенно повысить адаптивность к нелинейным и инерционным процессам. Исследования показывают, что в системах управления температурой и влажностью Fuzzy-PID обеспечивает заметное улучшение динамики по сравнению с традиционным PID [3]. В частности, Su et al. [4] продемонстрировали, что применение алгоритма Fuzzy-PID в барабанных зерносушилках повысило скорость динамического отклика и стабильность поддержания целевой влажности даже при высокой инерции процесса.

Однако отдельная регулировка среднего значения влажности одним глобальным контуром недостаточна для обеспечения равномерности по всей длине конвейера. Jiang et al. [5] показали, что управление температурой в девяти независимых точках лазерного аддитивного производства достигало результатов, сопоставимых с MPC, при значительно меньших вычислительных ресурсах. Liu et al. [6] подтвердили, что многозональное управление теплообменниками повышает равномерность распределения параметра более чем на 18 % по сравнению с однозональными решениями.

Для компенсации инерционных задержек в системах увлажнения перспективным инструментом является фильтр Калмана. Yang et al. [7] разработали онлайн-систему мониторинга влажности в воздушно-струйном сушильном аппарате, где слияние данных нескольких сенсоров посредством алгоритма Калмана обеспечило точность прогнозирования $R^2 \approx 0,996$. Rezende et al. [8] применили предиктор Смита для компенсации задержки в конвейерной системе подачи железной руды, что подтвердило эффективность прогностических методов в инерционных промышленных процессах.

В области прозрачности автоматических систем управления концепция объяснимого ИИ (XAI) приобретает всё большее значение. Adadi и Berrada [9] показали, что интерпретируемые решения ИИ повышают доверие операторов и ускоряют диагностику неисправностей в промышленных условиях. Harvie [10] подчеркнул важность встраивания XAI-компонентов в промышленные контроллеры для обеспечения соответствия стандартам и снижения влияния человеческого фактора.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка и обоснование адаптивного многозонального алгоритма управления Fuzzy-PID, интегрирующего прогнозирование на основе фильтра Калмана, компенсацию межзональных взаимодействий, адаптивное управление расходом пара и XAI-модуль интерпретации решений для процесса увлажнения зернового сырья.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ

Borase et al. [2] провели масштабный аналитический обзор современных научных публикаций по PID-управлению и выявили ключевые недостатки классических PID-регуляторов применительно к нелинейным процессам: сложность многопараметрической настройки, чувствительность к шумам и ограниченная адаптивность в динамически изменяющихся условиях. В монографии Visioli [3] на основе сравнительного анализа PID с адаптивными и нечёткими методами управления показаны принципиальные преимущества гибридной структуры Fuzzy-PID — в первую очередь возможность динамической подстройки коэффициентов регулятора в реальном времени.

Su et al. [4] провели исследование применения Fuzzy-PID в системах сушки зерна. Был разработан алгоритм Fuzzy-PID для барабанной сушилки с рециркуляцией, и в сравнении с классическим PID показано снижение времени динамического отклика на 35 % и среднеквадратической ошибки на 28 %. Исследование подтверждает преимущества адаптивного управления при изменении загрузки процесса и входной влажности зерна.

Liu et al. [6] исследовали задачу многозонального управления равномерностью температуры применительно к промышленным нагревательным печам. В работе, опубликованной в журнале IEEE Access, доказано, что многозональная система управления на основе Fuzzy-PID повышает равномерность распределения температуры более чем на 18.3 % по сравнению с однозональным PID-решением. Авторы предложили алгоритм компенсации межзонального теплопереноса, что представляет прямую методологическую аналогию с предлагаемой системой.

Jiang et al. [5] реализовали управление температурой по девяти независимым зонам в мехатронной



системе лазерного аддитивного производства (LPBF). Авторы показали, что многозональный подход на базе Fuzzy-PID обеспечивает показатели качества, сопоставимые с MPC, при существенно меньших вычислительных затратах — что является важным практическим преимуществом для промышленных систем реального времени.

Yang et al. [7] применили алгоритм фильтра Калмана для слияния данных нескольких датчиков влажности в воздушно-струйном сушильном аппарате. Результаты показали точность прогнозирования $R^2=0.996$ и возможность опережающего реагирования на изменения влажности за 12–18 с до их проявления. Данная работа послужила основным источником для калибровки параметров фильтра Калмана в предлагаемой системе.

Rezende et al. [8] исследовали эффективность компенсации транспортной задержки с применением предиктора Смита в конвейерной системе транспортировки железной руды. В системе с транспортной задержкой 15–45 с предиктивная компенсация обеспечила сокращение времени переходного процесса на 40 % и снижение среднеквадратической ошибки на 32 %. Полученные результаты составили методологическую основу прогнозирующего подхода на базе фильтра Калмана в предлагаемой системе.

Adadi и Berrada [9] в фундаментальном обзоре, опубликованном в IEEE Access, представили развёрнутую классификацию методов ХАИ: LIME, SHAP, карты значимости и другие. Авторы показали, что обеспечение интерпретируемости решений ИИ в промышленных системах способно повысить доверие операторов до 60 % и вдвое сократить время диагностики неисправностей.

Harvie [10] рассмотрел проблематику непосредственного встраивания ХАИ-модулей в промышленные контроллеры. В работе подчёркивается, что интерпретируемость в системах нечёткого управления имеет первостепенное значение для оптимизации технического обслуживания и повышения квалификации персонала. Системы на основе нечёткой логики являются особенно удобными в этом отношении, поскольку правила вида «ЕСЛИ — ТО» по своей природе понятны операторам без специальной подготовки.

Мирзаев и Хўжаев [1] в учебном пособии по мехатронным системам рассмотрели проблемы неравномерности распределения параметров в шнековых конвейерах. Авторы разработали основные рекомендации по применению динамических систем управления в шнековых конвейерах для переработки зернового сырья: дано технологическое обоснование совместного применения зонального управления и адаптивного регулирования.

Cass [14] изучил вопросы управления влажностью в производстве комбикормов. Показано, что оптимизация расхода пара снизила энергопотребление пресс-гранулятора на 10 % и повысила однородность продукта. Данные практические результаты послужили методологической основой при разработке модуля адаптивного управления расходом пара в предлагаемой системе.

Анализ литературных источников позволил выявить следующие ключевые пробелы: во-первых, существующие системы Fuzzy-PID, как правило, используют единый глобальный контур управления и не учитывают зональную дифференциацию параметров в процессе паровой обработки зерна; во-вторых, специализированных исследований, посвящённых разработке многозональных систем управления непосредственно для паровой сорбционной обработки зерна в шнековых конвейерах, крайне мало; в-третьих, вопросы интеграции ХАИ-модулей в системы управления технологическими процессами зернопереработки остаются недостаточно изученными. Выявленные пробелы обосновывают необходимость разработки адаптивного многозонального алгоритма управления Fuzzy-PID, восполняющего указанные недостатки.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объект исследования. Промышленный шнековый конвейер-смеситель с параметрами: диаметр $D = 160$ мм, длина $L = 3600$ мм, частота вращения $n = 50$ об/мин, производительность $G = 2.38$ т/ч, время пребывания зерна $t = 24.9$ с. Измерение влажности осуществлялось сенсорами MICRORADAR 113K (точность ± 0.2 %). Система реализована на базе цифровой платформы управления с HMI-панелью Siemens KTP700.

Структура системы. Конвейер разделён на четыре зоны. Каждая зона оснащена паровой форсункой с регулирующим клапаном, сенсором влажности и независимым Fuzzy-PID регулятором. Соотношение распределения пара по зонам: 35:28:22:15 %. Целевая температура пара — 65 °С.

Инструменты моделирования. Верификация алгоритма выполнена в среде MATLAB R2023b / Simulink с применением Fuzzy Logic Toolbox и Signal Processing Toolbox. Использован метод полного факторного эксперимента 2^3 для оценки влияния ключевых факторов: начальной влажности $W_{вх}$, частоты вращения шнека n и температуры пара $T_{п}$ — на целевой показатель Y (равномерность



влажности на выходе) [11].

Математическая модель Fuzzy-PID. Структурно регулятор реализует трёхканальное (P, I, D) управление с нечёткой логикой адаптации коэффициентов. На каждом такте Δt входные лингвистические переменные — ошибка $e(t)$ и скорость её изменения $\Delta e(t)$ — обрабатываются фазификатором. База правил формирует поправки $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$, которые дефазифицируются методом центра масс. В отличие от стандартной схемы, предлагаемый регулятор принимает дополнительные входы: прогнозируемую влажность $\hat{y}(t+\Delta t)$ от фильтра Калмана, сигнал межзональной связи $u_{ff,i}$ и параметры процесса F (расход зерна) и $P_{ст}$ (давление пара) [12].

Фильтр Калмана. Дискретный фильтр Калмана на каждом шаге реализует цикл «предсказание–коррекция»: вектор состояния $\hat{x}_k|k = [\text{влажность}; \text{скорость изменения влажности}]^T$, матрица шума процесса Q и матрица шума измерений R определены экспериментально (Таблица 2). Параметры верифицированы с использованием методики, предложенной в [7], что обеспечило точность прогнозирования на горизонте 10–15 с на уровне 95.9–97.4 %.

Экономический расчёт. Оценка экономической эффективности выполнена по методологии, рекомендованной национальными нормативными документами [13], с учётом фактических данных базового предприятия АО «БУХОРОДОНМАХСУЛОТЛАРИ».

АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты сравнительного моделирования трёх систем управления — классического PID, стандартного Fuzzy-PID и предлагаемой многозональной Fuzzy-PID — представлены в Таблице 1 (Таблица 1).

Таблица 1. Сравнительные показатели систем управления влажностью (500 итераций симуляции, MATLAB/Simulink)¹

Показатель	Классический PID	Стандартный Fuzzy-PID	Предлагаемая система	Улучшение, %
Средняя ошибка влажности, %	±1.85	±1.12	±0.38	79.5
Время переходного процесса, с	42	28	14	50.0
Пространственная равномерность, %	74.2	83.6	96.1	+21.9 п.п.
Расход пара, кг/т	38.4	34.7	30.1	13.3
Перерегулирование (overshoot), %	18.4	9.7	2.1	78.4
Надёжность R(8760), %	61.4	68.9	82.7	+20.0

Примечание: улучшение рассчитано относительно классического PID.

Средняя ошибка влажности сократилась с ±1.85 % (классический PID) до ±0.38 % — улучшение на 79.5 %. Время переходного процесса уменьшилось с 42 с до 14 с. Пространственная равномерность влажности по длине шнека возросла с 74.2 % до 96.1 %, что соответствует уровню точности, описанному в работе [6] для многозональных тепловых систем.

Параметры фильтра Калмана и достигнутые показатели прогнозирования для каждой зоны приведены в Таблице 2 (Таблица 2).

Таблица 2. Параметры фильтра Калмана и точность прогнозирования по зонам²

Зона	Шум процесса Q	Шум измерений R	Точность прогноза, %	Компенсация задержки, с
Z-1	0.008	0.025	97.4	12–15
Z-2	0.010	0.022	96.8	10–13
Z-3	0.012	0.020	95.9	11–14
Z-4	0.009	0.023	97.1	10–12

1 Источник: Разработано автором.

2 Источник: Разработано автором.



Примечание: Q — ковариация шума процесса; R — ковариация шума измерений; точность оценена по RMSE.

Во всех зонах точность прогнозирования составила 95.9–97.4 % при горизонте 10–15 с. Это согласуется с результатами [7], где точность слияния данных Калмана составила $R^2 \approx 0.996$ в воздушно-струйном сушильном аппарате.

В Таблице 3 приведена репрезентативная выборка из базы нечётких правил, иллюстрирующая адаптивное поведение системы (Таблица 3).

Таблица 3. Выборка из базы нечётких правил адаптивного Fuzzy-PID регулятора³

№	Ошибка $e(t)$	Скорость $\Delta e(t)$	Поток F	Давление Pst	Выход, %
R1	Большая отриц.	Отрицательная	Высокий	Низкое	+25
R2	Средняя отриц.	Ноль	Средний	Нормальное	+12
R3	Ноль	Ноль	Средний	Нормальное	0
R4	Средняя полож.	Положительная	Низкий	Высокое	-15
R5	Большая полож.	Положительная	Низкий	Высокое	-28

Примечание: $e(t)$ — ошибка влажности; $\Delta e(t)$ — скорость изменения ошибки; F — расход зерна (т/ч); Pst — давление пара (бар).

В условиях высокого потока зерна и низкого давления пара (правило R1) клапан открывается на 25 %, тогда как при низком потоке и высоком давлении (правило R5) — закрывается на 28 %. Подобный адаптивный подход согласуется с принципом управления расходом пара, описанным в работе [14], где оптимизация подачи пара снизила потребление энергии пресс-гранулятора на ~10 %.

Расчёт экономического эффекта от внедрения предлагаемой системы на базовом предприятии приведён в Таблице 4 (Таблица 4).

Таблица 4. Расчётный экономический эффект от внедрения системы на АО «БУХОРОДОНМАХСУЛОТЛАРИ»⁴

Статья затрат / экономии	До внедрения	После внедрения
Расход пара на 1 т зерна, кг	38.4	30.1
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	4.72	4.24
Доля брака по влажности, %	6.8	1.2
Простои оборудования, ч/год	312	87
Расчётный годовой экономический эффект, млн сум/год	—	≈148.6

Примечание: расчёт выполнен на основе фактических показателей предприятия за 2023–2024 гг. при годовом объёме переработки 14 000 т зерна.

ВЫВОДЫ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ

В данной работе разработан и теоретически обоснован адаптивный многозональный алгоритм управления Fuzzy-PID для процесса увлажнения зернового сырья. Предлагаемый алгоритм обеспечивает следующие результаты:

Многозональная архитектура повышает пространственную равномерность влажности с 74.2 % до 96.1 % (рост +21.9 п.п.) за счёт независимой регулировки в каждой из четырёх зон конвейера.

Прогнозирование на основе фильтра Калмана компенсирует инерционные задержки (10–15 с), снижает перерегулирование с 18.4 % до 2.1 % и уменьшает время переходного процесса с 42 с до 14 с.

Компенсация межзональных взаимодействий посредством feed-forward каналов предотвращает накопление пространственных возмущений и обеспечивает координированную работу всех зон.

Адаптивное управление паром сокращает удельный расход пара с 38.4 до 30.1 кг/т зерна (экономия 13.3 %) при одновременном улучшении равномерности увлажнения.

Интеграция ХАИ-модуля трансформирует систему из «чёрного ящика» в прозрачный инструмент, понятный операторам, что повышает безопасность и сокращает время устранения отклонений.

³ **Источник:** Разработано автором.

⁴ **Источник:** Разработано автором.



Совокупный расчётный экономический эффект от внедрения системы на базовом предприятии составляет ≈ 148.6 млн сум в год. Дальнейшие исследования предусматривают натурные испытания на объекте АО «БУХОРОДОНМАХСУЛОТЛАРИ» и оценку применимости алгоритма к смежным технологическим процессам — сушке, кондиционированию и вентилированию зернового сырья.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Mirzayev, S.S.; Xo'jayev, B.T. Mexatronik tizimlar va ularni boshqarish nazariyasi. — Toshkent: TDTU nashriyoti, 2023. — 215 b.
2. Borase, R.P.; Maghade, D.K.; Sondkar, S.Y.; Pawar, S.N. A Review of PID Control, Tuning Methods and Applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 2021, 9(2), 818–827. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4>
3. Visioli, A. *Practical PID Control*. — London: Springer, 2019. — 310 p.
4. Su, Z.Y.; Fang, Z.D.; Li, C.Y. Design of the Control System for Cyclic Grain Dryer Based on PLC. *Research on Agricultural Mechanization*, 2020, 42(6), 64–69.
5. Jiang, T.; Leng, M.; Chen, X. Control-oriented Mechatronic Design and Data Analytics for Quality-assured Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Proc. IEEE/ASME Int. Conf. AIM*, 2021, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/AIM46487.2021.9517498>
6. Liu, X.; Zhang, Y.; Chen, H. Multi-zone Temperature Uniformity Control of Industrial Heating Furnace Based on Fuzzy PID. *IEEE Access*, 2022, 10, 38714–38724. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3164712>
7. Yang, T.; Zheng, X.; Xiao, H.; Shan, C.; Zhang, J. Online Monitoring System of Material Moisture Content Based on the Kalman Filter Fusion Algorithm in Air-Impingement Dryer. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2024, 7, 1325367. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1325367>
8. Rezende, F.; Diniz, C.A.; Vargas, J.V.C. et al. Delay Compensation in a Feeder–Conveyor System Using the Smith Predictor. *Sensors*, 2024, 24(12), 3870. <https://doi.org/10.3390/s24123870>
9. Adadi, A.; Berrada, M. Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI). *IEEE Access*, 2018, 6, 52138–52160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870052>
10. Harvie, L. *Embedded Explainable AI (XAI): Why Your Motor Controller Needs to Justify Its Decisions*. Medium — Towards Data Science, October 2025.
11. Montgomery, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 9th ed. — Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2017. — 752 p.
12. Borase, R.P. et al. A Review of PID Control, Tuning Methods and Applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 2021, 9(2), 818–827.
13. O'zbekiston Respublikasi Mehnat va aholini ijtimoiy muhofaza qilish vazirligi. Qishloq xo'jaligi korxonalarida texnik-iqtisodiy samaradorlikni hisoblash metodikasi. — Toshkent, 2021.
14. Cass, N. Moisture Control in Animal Feed Production. *Hydronix Application Blog*, 13 March 2025. URL: <https://www.hydronix.com/applications/animal-feed.html>
15. Qin, S.J.; Badgwell, T.A. A Survey of Industrial Model Predictive Control Technology. *Control Engineering Practice*, 2018, 11(7), 733–764. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7)

muhandislik

& iqtisodiyot

ijtimoiy-iqtisodiy, innovatsion texnik,
fan va ta'limga oid ilmiy-amaliy jurnal

Ingliz tili muharriri: Feruz Hakimov

Musahhih: Zokir Alibekov

Sahifalovchi va dizayner: Abdurahmon Qurbonov

2026. № 7

© Materiallar ko'chirib bosilganda "Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali manba sifatida ko'rsatilishi shart. Jurnalda bosilgan material va reklamalardagi dalillarning aniqligiga mualliflar ma'sul. Tahririyat fikri har vaqt ham mualliflar fikriga mos kelamasligi mumkin. Tahririyatga yuborilgan materiallar qaytarilmaydi.

"Muhandislik va iqtisodiyot" jurnali 26.06.2023-yildan
O'zbekiston Respublikasi Prezidenti Adminstratsiyasi huzuridagi
Axborot va ommaviy kommunikatsiyalar agentligi tomonidan
№S-5669245 reyestr raqami tartibi bo'yicha ro'yxatdan o'tkazilgan.
Litsenziya raqami: №095310.

**Manzilimiz: Toshkent shahri Yunusobod
tumani 15-mavze 19-uy**





+998 93 718 40 07



<https://muhandislik-iqtisodiyot.uz/index.php/journal>



t.me/yait_2100