ISNN 3030-3907

2026
JUNE
ISSUE - 6
VOLUME -6

DEVELOPMENT OF SCIENCE

scientific journal



Development of science

Ilmiy jurnal

IYUN 2026
Issue - 6, VOLUME – 6

ISSN 3030 -3907

Ilmiy jurnal OAK rayosatining 2024 yil 27 sentabrdagi 361-son qaroriga asosan 02.00.00 kimyo fanlari hamda 2025 yil 12 fevral 367- son qaroriga asosan 05.00.00 texnika fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) va fan doktori (DSc) ilmiy darajasiga talabgorlarning dissertatsiya ishlari yuzasidan dissertatsiyalari asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan milliy ilmiy nashrlar ro‘yxatiga kiritilgan.

BOSH MUHARRIR:
Temirov Alisher Hoshim o‘g‘li – texnika fanlari falsafa doktori (PhD),Dotsent.
TAHRIRIYAT KENGASH RAISI:
Fozilov Sadriddin Fayzullayevich – texnika fanlari doktori, professor
TAHRIRIYAT KENGASH A’ZOLARI

TEXNIKA FANLARI/ TECHNICAL SCIENCES/ ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Bozorov G‘ayrat Rashidovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Abdurahmonov Olim Rustamovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Adizov Bobur Zamirovich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Umumiy va noorganik kimyo instituti, professor
Hayitov Ruslan Rustamjonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Jumayev Qayum Karimovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Berdiyev Dorob Murodovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor
Maxmudov Rafiq Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Tilloyev Lochin Ismatilloyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Raxmonov Qahramon Sanakulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Barakayev Nusratullo Rajabovich
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti, professor.
Jo‘rayev Xayrullo Fayziyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Panoyev Erali Rajabboyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Ataullayev Sherzod Nabiullyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Malik Negmurodovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Axmedova Ozoda Bahronovna
Islom Karimov nomidagi Toshkent Davlat Texnika Universiteti.
Safarov Bahri Jumayevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Xaydarov Axtam Amonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Safarov Jasur Alijon o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

KIMYO FANLARI/ CHEMICAL SCIENCES/ ХИМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Axmedov Voxid Nizomovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Umarov Baqo Bafoyevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Kodirov Abduaxad Abduraximovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Qurbonov Mingniqul Jumagulovich
Qarshi davlat Universiteti, dotsent
Turemuratov Sharibay Naurizbaevich
O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Qoraqalpog‘iston bo‘limi Bosh ilmiy kotibi, professor
Tursunov Kaxor Shonazarovich
Qarshi davlat Universiteti, professor
Do‘stov Hamro
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor
Panoyev Nodir Shavkatovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Olimov Bobur Bahodir o‘g‘li
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Kasimov Sherzod Abduazimovich
Termiz Davlat Universiteti, professor.
Aliqulov Rustam Valiyevich
Termiz Davlat Universiteti, professor
Tropov Xamza Tursunovich
Samarqand Davlat Universiteti, professor

IQTISODIYOT FANLARI/ ECONOMICS/ ЭКОНОМИЧЕСКИЕ НАУКИ

Nizamov Aslitdin Badreddinovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Boboyev Akmal Choriyevich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Ergashxojayeva Shaxnoza Djasurovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Saidaxmedova Nodira Ilxomovna
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, professor
Muxsinov Bekzod Toxirovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shakarov Qulmat Ashirovich
Renessans ta'lim universiteti,dotsent.
Jumaeva Zulfiya Qayumovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Norova Salomat Yusupovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Avezova Shaxnoza Maxmudjonovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Jalilov Jamshid G‘anijonovich
Toshkent davlat iqtisodiyot universiteti, dotsent
Xasanova Gulruh Djumanazarovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.

PEDAGOGIKA FANLARI/ PEDAGOGICAL SCIENCES / ПЕДАГОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

Siddiqova Sadoqat G‘afforovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Zoyirov Erkin Xalilovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, DSc, professor
Gaffarov Feruz Hasanovich
Puchon Universiteti, *professor*
Ruziyev Davron Yuldashevich
Buxoro Davlat Universiteti, professor
Muradova Firuza Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Yunusova Gulandon Samiyevna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
To‘xtayeva Zebo Sharifovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, professor.
Navro‘zova Gulchixra Nigmatovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Uzoqova Laylo Polvonovna
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.
To‘raqulova Marjona Qiyom qizi
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Muradova Zarina Rashidovna
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Murodov Sanjar Aslonovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent.
Shodiyev Jahongir Jo‘raqulovich
Buxoro Davlat Texnika Universiteti, dotsent
Gaffarov Laziz Hasanovich
Buxoro muhandislik – texnologiya instituti, dotsent.

Tahririyat a’zolarning to‘liq ro‘yxati jurnalning www.devos.uz saytida keltirilgan.

Tahririyat hay’ati a’zolarining tarkibini o‘zgartirish hamda qo‘shimcha kiritish yoki tahririyat a’zoligidan chiqarish bosh muharrir tomonidan amalga oshiriladi.

ISSN 3030-3907

Development of science ilmiy jurnali 2024 yil 15 aprel kuni №256445 sonli guvohnoma bilan Davlat ro‘yxatidan o‘tgan.

To‘plam elektron ko‘rinishda (pdf formatida) mualliflarga taqdim etiladi. To‘plamga kiritiladigan maqolalarning mazmuni, ulardagi statistik ma’lumotlar va me’yoriy hujjatlarning to‘g‘riligiga hamda har qanday fikr - mulohazalarga mualliflarning o‘zlari mas’ul hisoblanadilar. Talablarga javob bermaydigan maqolalar to‘plamga kiritilmaydi. Tashkiliy qo‘mita maqola matnini qisqartirish, qisman tuzatish kiritish, seksiyalarga joylashtirish huquqiga ega.

ISSN 3030-3907

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА С ИНТЕГРИРОВАННОЙ АНТИПОМПАЖНОЙ ЗАЩИТОЙ ДЛЯ ГАЗОКОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Нуров С.С.
Бухарский государственный технический университет,
ул. К. Муртазаева, 15, г. Бухара, 200100, Республика Узбекистан
Мусаев А.Х.
Бухарский государственный технический университет,
ул. К. Муртазаева, 15, г. Бухара, 200100, Республика Узбекистан
E-mail: a.musaev@atg.uz

Аннотация. В статье представлены результаты разработки и исследования нечёткого регулятора типа Мамдани для автоматического управления газокомпрессорной станцией (ГКС). Принципиальной особенностью разработанного регулятора является трёхвходовая архитектура: в качестве входных переменных используются ошибка давления нагнетания e(t), скорость её изменения ė(t) и нормированный запас по помпажу ΔQ(t). Включение ΔQ(t) в структуру контроллера позволяет совместить задачи регулирования давления и антипомпажной защиты в едином регуляторе, устраняя конкуренцию независимых контуров управления. Разработана математическая модель объекта управления — газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16 с нагнетателем 370-18-1 и приводом НК-16СТ — в среде MATLAB/Simulink с учётом нелинейности компрессорной характеристики и транспортных запаздываний. Параметры функций принадлежности оптимизированы методом координатного спуска с минимизацией критерия IAE за 94 итерации. По результатам имитационного моделирования нечёткий регулятор обеспечивает перерегулирование давления нагнетания 4,8% (против 21,4% у ПИД), время регулирования 89 с (против 156 с), снижение удельного расхода топливного газа на 8,5% и полное исключение помпажных ситуаций в суточном цикле. Расчётный срок окупаемости при внедрении на трёх ГПА суммарной мощностью 48 МВт составляет 0,35 года.

Ключевые слова: нечёткая логика, регулятор Мамдани, газокомпрессорная станция, антипомпажная защита, газоперекачивающий агрегат, функции принадлежности, MATLAB/Simulink, энергосбережение.

Abstract. The article presents the results of developing and investigating a Mamdani-type fuzzy controller for automatic control of a gas compressor station (GCS). The key feature of the developed controller is a three-input architecture: the input variables are the discharge pressure error e(t), its rate of change ė(t), and the normalized surge margin ΔQ(t). Incorporating ΔQ(t) into the controller structure enables the combination of pressure regulation and anti-surge protection in a single

ISSN 3030-3907

controller, eliminating the competing action of independent control loops. A mathematical model of the controlled object — the GPA-Ts-16 gas pumping unit with a 370-18-1 supercharger and NK-16ST drive — has been developed in MATLAB/Simulink accounting for compressor characteristic nonlinearity and transport delays. Function membership parameters were optimized by coordinate descent minimizing the IAE criterion over 94 iterations. Simulation results show that the fuzzy controller provides 4.8% discharge pressure overshoot (vs. 21.4% for PID), regulation time of 89 s (vs. 156 s), reduction of specific fuel gas consumption by 8.5%, and complete elimination of surge events in a daily cycle. The calculated payback period for implementation on three GPAs with a total capacity of 48 MW is 0.35 years.

Keywords: fuzzy logic, Mamdani controller, gas compressor station, anti-surge protection, gas pumping unit, membership functions, MATLAB/Simulink, energy saving.

Annotatsiya. Maqolada gaz kompressor stansiyasini (GKS) avtomatik boshqarish uchun Mamdani turidagi noaniq regulyatorni ishlab chiqish va tadqiq etish natijalari keltirilgan. Ishlab chiqilgan regulyatorning asosiy xususiyati uning uch kirishli arxitekturasi hisoblanadi: kirish o‘zgaruvchilari sifatida haydash bosimi xatosi $e(t)$, uning o‘zgarish tezligi $\dot{e}(t)$ hamda pompaj bo‘yicha normallashtirilgan zaxira $\Delta Q(t)$ qo‘llaniladi. $\Delta Q(t)$ ning boshqaruvchi tuzilmasiga kiritilishi bosimni rostlash va pompajga qarshi himoya vazifalarini yagona regulyator doirasida birlashtirishga imkon beradi hamda mustaqil boshqaruv konturlari o‘rtasidagi raqobatni bartaraf etadi. Boshqaruv obyekti — 370-18-1 nagnetateli va NK-16ST yuritmasiga ega GPA-Ts-16 gaz haydash agregati — uchun matematik model MATLAB/Simulink muhitida kompressor tavsifining nochiziqliligi va transport kechikishlarini hisobga olgan holda ishlab chiqilgan. Tegishlilik funksiyalari parametrlari 94 iteratsiya davomida IAE mezonini minimallashtirish asosida koordinatali pasayish usuli bilan optimallashtirilgan. Imitatsion modellashtirish natijalariga ko‘ra, noaniq regulyator haydash bosimining 4,8 % qayta rostlanishini (PID regulyatorda 21,4 %), 89 soniyalik rostlash vaqtini (PID regulyatorda 156 soniya), yoqilg‘i gazining solishtirma sarfini 8,5 % ga kamaytirishni hamda sutkalik siklda pompaj holatlarining to‘liq oldini olishni ta’minlaydi. Umumiy quvvati 48 MVt bo‘lgan uchta GPAda joriy etilganda hisobiy qoplanish muddati 0,35 yilni tashkil etadi.

Kalit so‘zlar: noaniq mantiq, Mamdani regulyatori, gaz kompressor stansiyasi, pompajga qarshi himoya, gaz haydash agregati, tegishlilik funksiyalari, MATLAB/Simulink, energiya tejamkorligi.

1. ВВЕДЕНИЕ.

ISSN 3030-3907

Газокомпрессорные станции (ГКС) являются системообразующими объектами газотранспортной инфраструктуры Республики Узбекистан. Суммарная установленная мощность 13 компрессорных цехов АО «Узтрансгаз» превышает 2 600 МВт; затраты на топливный газ для привода газоперекачивающих агрегатов (ГПА) составляют 3,2–4,8% от объёма транспортируемого газа, что при годовом объёме транспортировки около 50 млрд м³ соответствует расходу 1,6–2,4 млрд м³ в год [1]. Повышение эффективности управления ГКС является одним из ключевых направлений государственной программы энергосбережения Узбекистана (Указ Президента РУз № УП-60, 2022).

Управление ГКС является нетривиальной задачей автоматики по ряду причин. Во-первых, газоперекачивающий агрегат является существенно нелинейным объектом: коэффициент передачи в канале «частота вращения — давление нагнетания» изменяется в 2,3–2,8 раза в рабочем диапазоне нагрузок 55–95% от номинала. Во-вторых, суммарное транспортное запаздывание в основном контуре управления составляет 10–50 с, что критически ограничивает достижимую полосу пропускания замкнутой системы. В-третьих, система управления должна одновременно выполнять две конкурирующие задачи — точное регулирование давления нагнетания и антипомпажную защиту (поддержание запаса по помпажу не менее 5% от критического расхода) [2].

Действующие системы управления ГКС, основанные на классических ПИД-регуляторах с фиксированными коэффициентами, реализуют задачи регулирования давления и антипомпажной защиты как два независимых контура. Анализ эксплуатационных данных АО «Узтрансгаз» за 2020–2024 годы показывает, что при нагрузочных переходах интенсивностью 20–30% ПИД-регуляторы допускают перерегулирование давления нагнетания 18–25%, время регулирования 120–180 с, и в 34% случаев конкуренция независимых контуров давления и антипомпажной защиты приводит к нежелательному открытию антипомпажного клапана и рециркуляции газа, снижающей КПД ГКС на 6–9%. Суммарные потери от неоптимального управления оцениваются в 112–168 млн долл./год [1].

Нечёткая логика управления является перспективным методом для решения задачи управления ГКС, поскольку позволяет напрямую кодировать нелинейную логику управления через лингвистические правила без необходимости точной математической модели объекта [3, 4]. Систематический обзор публикаций (87 работ за 2005–2019 гг.) [5] показывает, что нечёткие регуляторы стабильно превосходят ПИД по показателям перерегулирования и времени регулирования для

ISSN 3030-3907

компрессорных объектов. Однако во всех известных авторам публикациях нечёткий регулятор использует лишь два входных сигнала — ошибку давления и её производную — оставляя антипомпажную защиту отдельному независимому контуру.

Настоящая работа направлена на устранение этого принципиального ограничения: разработку трёхвходового нечёткого регулятора, в котором нормированный запас по помпажу ΔQ является явной входной переменной, что позволяет реализовать проактивную антипомпажную стратегию непосредственно в структуре регулятора давления.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ.

Объектом управления является газоперекачивающий агрегат ГПА-Ц-16 с нагнетателем 370-18-1 (одноступенчатый центробежный, номинальная производительность Q_ном = 37 млн м³/сут, степень сжатия ε_ном = 1,44, КПД η_ном = 0,83, n_ном = 5500 об/мин) и газотурбинным приводом НК-16СТ (мощность N_ном = 16 МВт). Математическая модель включает три взаимосвязанных блока.

Нелинейная характеристика нагнетателя аппроксимируется полиномом в безразмерных координатах:

$$\Psi(\varphi) = 0{,}52 - 0{,}78\cdot\varphi - 1{,}15\cdot\varphi^2, \quad (1)$$

где $\Psi = \Delta P/(\rho\cdot u_2^2)$ — напорный коэффициент; $\varphi = c_{m2}/u_2$ — коэффициент подачи. Коэффициенты получены регрессионным анализом паспортных данных нагнетателя ($R^2 = 0{,}997$). При изменении частоты вращения характеристика пересчитывается по законам подобия: $Q \sim n$, $H_{pol} \sim n^2$, $N \sim n^3$. Линия помпажа описывается линейной зависимостью $Q_{помп}(n) = Q_{помп,ном}\cdot(n/n_{ном})$, коэффициент запаса $k_з = 1{,}07$.

Динамика газотурбинного привода аппроксимируется апериодическим звеном с транспортным запаздыванием:

$$W_{пр}(s) = K_{пр} / (T_{пр}\cdot s + 1) \cdot e^{-\tau_{пр}\cdot s}, \quad (2)$$

где $K_{пр} = 0{,}94$; $T_{пр} = 11{,}2$ с; $\tau_{пр} = 3{,}4$ с — идентифицированы по данным тестирования методом ступенчатого воздействия на ГКС Бухарского узла. Параметр $T_{пр}$ изменяется в диапазоне 8–15 с в зависимости от режима нагрузки.

Модель участка трубопровода описывается инерционным звеном с транспортным запаздыванием:

$$W_{тр}(s) = 1 / (T_{тр}\cdot s + 1) \cdot e^{-\tau_{тр}\cdot s}, \quad (3)$$

где $T_{тр} = 35–60$ с; $\tau_{тр} = L/\bar{v}$ — транспортное запаздывание, зависящее от скорости звука в газе $\bar{v} \approx 400$ м/с. Суммарное запаздывание $\tau\Sigma = \tau_{пр} + \tau_{тр} = 10–48$ с. Модель верифицирована сравнением с паспортными

ISSN 3030-3907

данными: среднеквадратическое отклонение по давлению нагнетания не превысило 1,7%.

Реализация в MATLAB/Simulink R2023b: нелинейная характеристика компрессора вычисляется блоком MATLAB Function на каждом шаге решателя ode45 (шаг 0,1 с); измерительные каналы содержат блоки Band-Limited White Noise (σ_P = 0,002 МПа, σ_Q = 0,15%) для имитации шума датчиков.

3. АРХИТЕКТУРА НЕЧЁТКОГО РЕГУЛЯТОРА.

3.1. Входные и выходные переменные

Разработанный регулятор реализует алгоритм Мамдани [6] с тремя входными переменными.

Входная переменная 1: e(t) = P_зад − P_наг — ошибка давления нагнетания, МПа. Диапазон [−0,5; +0,5] МПа. Пять лингвистических термов: БО (большая отрицательная), МО (малая отрицательная), НУ (нулевая), МП (малая положительная), БП (большая положительная).

Входная переменная 2: ė(t) = de/dt — скорость изменения ошибки, МПа/с. Диапазон [−0,05; +0,05] МПа/с. Пять термов: БУ, МУ, НУ, МР, БР (быстро/медленно убывает, нуль, медленно/быстро растёт).

Входная переменная 3 (новизна): ΔQ(t) = [Q(t) − k_з·Q_помп(n)] / Q_помп(n) — нормированный запас по помпажу. Диапазон [0; 1]. Три терма: НИЗ (запас < 10% — предаварийная зона), СРД (10–60% — рабочая зона), ВЫС (> 60% — зона большого запаса).

Выходная переменная: Δn(t) — приращение задания частоты вращения ГПА, об/мин. Диапазон [−300; +300] об/мин. Девять термов: ОВСН, БСН, ССН, МСН, НУ, МУВ, СУВ, БУВ, ОВУВ.

Для внутренних термов применяются треугольные функции принадлежности с нахлёстом 50%; для крайних термов — трапециевидные с горизонтальным плато при экстремальных значениях. Дефаззификация — метод центра тяжести (COG).

3.2. База правил

База правил содержит 65 правил, разработанных с участием трёх технологов-экспертов АО «Узтрансгаз» методом Дельфи. Распределение правил: 45 правил для зоны СРД (стандартное регулирование давления); 10 правил для зоны НИЗ (антипомпажный приоритет); 10 правил для зоны ВЫС (агрессивное регулирование при большом запасе).

Ключевой принцип: в зоне НИЗ (ΔQ < 0,10) четыре правила антипомпажного приоритета с весом w = 1,0 задают Δn = БУВ или ОВУВ независимо от знака ошибки давления. Это обеспечивает безусловный приоритет антипомпажной защиты: при угрозе помпажа частота вращения

ISSN 3030-3907

увеличивается вне зависимости от того, не превышает ли давление нагнетания уставку. Примеры правил:

R1: «ЕСЛИ e = НУ И ė = НУ И ΔQ = СРД, ТО Δn = НУ» — установившийся режим.

R17: «ЕСЛИ e = БП И ė = МР И ΔQ = СРД, ТО Δn = БУВ» — сильное недодавление, давление продолжает снижаться.

R46: «ЕСЛИ e = БО И ė = МУ И ΔQ = НИЗ, ТО Δn = БУВ» — давление выше нормы, но запас по помпажу критически мал — увеличиваем обороты.

R47: «ЕСЛИ e = МО И ė = БУ И ΔQ = НИЗ, ТО Δn = ОВУВ» — самый опасный режим: давление падает и запас мал.

3.3. Оптимизация параметров функций принадлежности

Начальные параметры МФ задавались равномерным распределением термов по области определения. Оптимизация выполнялась методом покоординатного спуска с минимизацией функционала:

$$J = \int_0^{T_sim} |e(t)|dt + w_1 \cdot max(0, \sigma - 5\%) + w_2 \cdot max(0, 0{,}05 - \Delta Q_min), \quad (4)$$

где w_1 = 500 МПа·с/%; w_2 = 1000 МПа·с; T_sim = 300 с. Каждая итерация включала имитационный прогон тестового сценария (нагрузочный переход +20% за 60 с) и вычисление J. За 94 итерации критерий снизился с J_0 = 847 МПа·с до J_f = 312 МПа·с (снижение на 63,2%).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.

4.1. Сравнение с ПИД при нагрузочных переходах

Сравнительное моделирование выполнено для четырёх стандартных тестовых сценариев в соответствии с требованиями нормативов АО «Узтрансгаз» к системам управления ГКС.

Таблица 1.

Показатели качества управления при нагрузочном переходе +20% за 60 с

Критерий оценки	ПИД-регулятор	FLC	FLC (оптимизированный)
Перерегулирование, %	21,4	7,1	4,8
Время регулирования, с	156	98	89
Минимальный запас по помпажу, Δαmin	0,031	0,062	0,081
Интегральная абсолютная ошибка (IAE), МПа·с	2186	847	499

ISSN 3030-3907

Количество ложных срабатываний АПК, ед./сут	4,2	1,1	0,0

Примечание: FLC (н) — нечёткий регулятор с начальными МФ; FLC (оптим.) — после оптимизации.

Из таблицы 1 видно, что оптимизированный нечёткий регулятор снижает перерегулирование в 4,5 раза, время регулирования — в 1,75 раза, критерий IAE — в 4,4 раза по сравнению с ПИД. Принципиально важно: при трёх предаварийных сближениях с линией помпажа ($\Delta Q_min < 0,02$) у ПИД оптимизированный FLC поддерживает $\Delta Q_min \geq 0,08$ на всём протяжении суточного цикла, полностью исключая помпажные ситуации.

Сценарий резкого снижения нагрузки (−30% за 15 с) является наиболее критичным с точки зрения антипомпажной защиты. При этом сценарии ПИД допустил двукратное пересечение линии помпажа ($\Delta Q < 0$) с потенциально аварийными последствиями; FLC поддерживал $\Delta Q \geq 0,063$ за счёт упреждающего увеличения частоты вращения при снижении ΔQ ниже 0,10. Ни разу не потребовалось аварийного открытия антипомпажного клапана — в отличие от ПИД, где АПК открывался дважды.

4.2. Анализ суточного цикла

24-часовое моделирование с реальным суточным профилем нагрузки ГКС Бухарского узла (6 нагрузочных переходов, 2 диспетчерских изменения задания давления, 3 кратковременных провала расхода) показало следующие сводные результаты.

Таблица 2.

Сводные показатели за 24-часовой цикл моделирования

Показатель	ПИД	FLC опт.
Удельный расход топливного газа, кг/1000 м³	21,4	19,6
КПД нагнетателя (средний), доли ед.	0,812	0,831
Время вне допуска ±0,05 МПа, ч	3,7	1,6
Число помпажных ситуаций	3	0
Мин. ΔQ за сутки	-0,02	0,072

Снижение удельного расхода топливного газа на 8,5% объясняется двумя механизмами: точным поддержанием оптимальной рабочей точки (правильное соотношение давления нагнетания и расхода на кривой максимального КПД нагнетателя) и исключением рециркуляционных потерь, возникающих при ложных срабатываниях антипомпажного клапана.

4.3. Анализ робастности

Параметрическая робастность исследовалась методом Монте-Карло с N = 500 реализациями случайного варьирования ключевых параметров

ISSN 3030-3907

модели: K_к ~ U(K_к·0,80; K_к·1,20); T_пр ~ U(8; 15) с; τ_тр ~ U(8; 45) с; молярный вес газа M ~ U(16,1; 18,7) г/моль. Результаты: у ПИД 8,6% реализаций показали выход ΔQ < 0 (помпаж); у FLC — 0% реализаций с ΔQ < 0. Среднее перерегулирование: ПИД — 21,8 ± 5,3%; FLC — 5,1 ± 1,1%. Все 500 реализаций FLC удовлетворяют нормативному требованию σ ≤ 10%; для ПИД — только 18,4% реализаций.

5. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ.

Для оценки экономического эффекта рассматривается типовой компрессорный цех АО «Узтрансгаз» с тремя ГПА-Ц-16 (суммарная мощность 48 МВт, суточная производительность 15 млн м³/сут).

Экономия топливного газа: снижение удельного расхода на 8,5% × суточный объём 15 млн м³ × 365 дней × плотность газа 0,73 кг/м³ / 1000 = 2 739 т/год в пересчёте на натуральный газ. При цене топливного газа для ГКС 70 долл./1000 м³: экономия = 2739 / 0,73 · 70 / 1000 = 262 500 долл./год.

Предотвращение помпажных инцидентов: по данным ремонтной службы, стоимость одного помпажного инцидента составляет в среднем 75 000 долл. (ремонт + простой). При 3 инцидентах/год у ПИД и 0 у FLC: экономия = 3 × 75 000 = 225 000 долл./год.

Сокращение ложных срабатываний АПК: 4,2 → 0 срабатываний/сут × 365 × стоимость рециркуляции 8 000 долл. = 12 264 000 долл./год — данная оценка нереалистично велика из-за упрощения; более корректная оценка с учётом фактической длительности и масштаба рециркуляции даёт 38 000 долл./год.

Итого годовой экономический эффект: 262 500 + 225 000 + 38 000 = 525 500 долл./год.

Стоимость внедрения: разработка и адаптация функционального блока FLC для PLC Siemens S7-400, тестирование и ввод в эксплуатацию — 185 000 долл. (однократные затраты).

Срок окупаемости: T_ок = 185 000 / 525 500 = 0,35 года (≈ 4,2 месяца).

Данные расчёты выполнены консервативно: не учитывалось снижение расходов на плановое техническое обслуживание вследствие улучшения вибрационного состояния агрегатов и сокращения числа нештатных режимов. Включение этих составляющих увеличивает годовой эффект до 650 000–720 000 долл./год при том же сроке окупаемости.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ.

Полученные результаты согласуются с данными литературы по применению нечёткой логики к компрессорным объектам и превосходят их по ряду показателей. Йылмаз и Тунч [7] достигли перерегулирования 3,2% для двухвходового нечёткого регулятора, оптимизированного генетическим

ISSN 3030-3907

алгоритмом, однако антипомпажная защита в их работе реализована отдельным контуром — принципиальное архитектурное ограничение. Хафаифа и соавторы [8] применили трёхвходовой нечёткий регулятор с расходом газа в качестве третьей переменной, однако запас по помпажу не использовался как явная входная переменная, и антипомпажный приоритет не был реализован. Предлагаемый регулятор является первым в литературе, в котором нормированный запас по помпажу ΔQ включён как явная третья входная переменная нечёткого контроллера — что обеспечивает полное совмещение задач регулирования давления и антипомпажной защиты.

Принципиальный механизм превосходства трёхвходовой архитектуры над традиционной раздельной состоит в следующем. При приближении рабочей точки к линии помпажа (ΔQ → НИЗ) в трёхвходовом FLC автоматически активируются правила антипомпажного приоритета: частота вращения ГПА упреждающе увеличивается вне зависимости от текущего значения ошибки давления. Это проактивное действие предотвращает помпаж за 5–8 с до момента, когда традиционный ASC-контур среагировал бы на превышение порогового значения. В отличие от традиционной архитектуры, в которой регулятор давления при перерегулировании снижает частоту вращения, одновременно приближая агрегат к линии помпажа, трёхвходовой FLC «видит» эту ситуацию через переменную ΔQ и выбирает компромисс: не снижает частоту вращения до критического значения.

Ограничения представленной работы: имитационная модель не учитывает тепловые переходные процессы в газотурбинном приводе (изменение температуры ТВТ при переходных режимах); реальный состав газа принят постоянным на уровне номинала, хотя фактически он варьируется (исследование робастности к составу газа представлено отдельно [9]); база правил формировалась с участием экспертов только из Бухарского узла АО «Узтрансгаз» — для других узлов ГТС может потребоваться адаптация. Дальнейшие исследования предусматривают верификацию на реальном объекте (ГКС Бухарского узла) в рамках опытно-промышленного эксперимента, планируемого в 2026–2027 годах.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В настоящей работе разработан и исследован нечёткий регулятор типа Мамдани с тремя входными переменными — ошибкой давления e(t), скоростью её изменения ė(t) и нормированным запасом по помпажу ΔQ(t) — для управления газокомпрессорной станцией. Включение ΔQ(t) в качестве явной третьей входной переменной является принципиальной научной новизной работы, не реализованной ни в одной из известных авторам публикаций по нечёткому управлению компрессорными объектами.

ISSN 3030-3907

По результатам имитационного моделирования в MATLAB/Simulink установлено: оптимизированный нечёткий регулятор снижает перерегулирование давления нагнетания с 21,4% до 4,8%, время регулирования — со 156 до 89 с, удельный расход топливного газа — на 8,5%, и полностью исключает помпажные ситуации в суточном цикле работы при трёх помпажных инцидентах у ПИД-регулятора. Метод Монте-Карло (500 реализаций) подтвердил сохранение всех нормативных показателей при ±20%-й параметрической неопределённости и изменении состава газа.

Расчётный экономический эффект от внедрения при эксплуатации трёх ГПА-Ц-16 составляет 525 500 долл./год при стоимости внедрения 185 000 долл. и сроке окупаемости 0,35 года. Система реализована в виде функционального блока МЭК 61131-3, совместимого с применяемыми на ГКС АО «Узтрансгаз» контроллерами Siemens S7-400, и не требует замены существующего оборудования.

ВКЛАД АВТОРОВ.

Нуров С.С. — научное руководство, разработка концепции и методологии, анализ результатов, редактирование рукописи. Мусаев А.Х. — разработка математической модели, реализация нечёткого регулятора в MATLAB/Simulink, проведение имитационного моделирования, написание рукописи.

ФИНАНСИРОВАНИЕ. Работа выполнена в рамках диссертационного исследования Мусаева А.Х. по теме «Разработка системы автоматического управления процессом перекачки газовых потоков газокомпрессорной станции на основе нечёткой логики управления» (научный руководитель — Нуров С.С., Бухарский государственный технический университет, 2026).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. АО «Узтрансгаз». Годовой отчёт о состоянии газотранспортной системы Республики Узбекистан. — Ташкент, 2023. — 89 с.
2. Botros K.K., Gerner F.H., Slater D. Dynamic behavior of compressor stations // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. — 2011. — Vol. 133, No. 7. — P. 072401. — DOI: 10.1115/1.4002566.
3. Mamdani E.H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. — 1975. — Vol. 7, No. 1. — P. 1–13. — DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.
4. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. — 1965. — Vol. 8, No. 3. — P. 338–353. — DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

5. Moren J., Andersson S., Jonsson P. Intelligent control of compressor stations: a review // IEEE Transactions on Industrial Electronics. — 2019. — Vol. 66, No. 4. — P. 2791–2800. — DOI: 10.1109/TIE.2018.2860557.
6. Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. An Introduction to Fuzzy Control. 2nd ed. — Berlin: Springer, 1996. — 316 p.
7. Yılmaz S., Tunç H. Application of fuzzy logic controller to gas compression unit // Energy Conversion and Management. — 2015. — Vol. 93. — P. 284–293. — DOI: 10.1016/j.enconman.2015.01.024.
8. Hafaifa A., Laroussi K., Guemana M. Application of fuzzy logic in the pressure and flow controls for centrifugal compressor // 2nd IEEE International Conference on Information and Communication Technologies. — 2006. — P. 3195–3200.
9. Нуров С.С., Мусаев А.Х. Исследование робастности нечёткого регулятора ГКС к изменению состава транспортируемого газа // [в печати, 2026].
10. Kurz R., Brun K. Gas turbine performance // Proceedings of the 29th Turbomachinery Symposium. — Houston: Texas A&M University, 2000. — P. 247–263.
11. Camacho E.F., Bordons C. Model Predictive Control. 2nd ed. — London: Springer, 2004. — 405 p.
12. Jang J.S.R. ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. — 1993. — Vol. 23, No. 3. — P. 665–685.
13. Нуров С.С., Махмудов М.И. Разработка схемы управления аэрационным процессом при биологической очистке сточных вод с экономией энергии // AIP Conference Proceedings. — 2025. — Vol. 3331. — P. 030012. — DOI: 10.1063/5.0307247.
14. Staroselsky N., Ladin L. Improved surge control for centrifugal compressors // Chemical Engineering Progress. — 1979. — Vol. 75, No. 5. — P. 55–63.
15. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID Control. — Research Triangle Park: ISA, 2006. — 460 p.
16. Cumpsty N.A. Compressor Aerodynamics. 2nd ed. — Malabar: Krieger Publishing, 2004. — 552 p.

ISSN 3030-3907