



УДК 621.34; 62-523

doi.10.70769/2181-284.ME.2(23).2026.13

NASOS STANSIYALARINI OPTIMALLASHTIRISHNING ZAMONAVIY
YONDASHUVLARI: CHASTOTALI ROSTLASH VA INTELLEKTUAL TIZIMLAR

Nabiyev Muslim Botir o'g'li

<https://orcid.org/0009-0001-2625-2332> e-mail: nabiyevmuslim899@gmail.com

O'zR FA Energetika muammolari instituti, Toshkent, O'zbekiston

Annotatsiya: Maqola nasos stansiyalarining energiya samaradorligini oshirish bo'yicha zamonaviy yondashuvlarning kompleks tahliliga bag'ishlangan bo'lib, unda chastota o'zgartirgichlar, noaniq mantiq algoritmlari va SCADA tizimlarining integratsiyasi ko'rib chiqiladi. Tadqiqot chastotali boshqaruvning o'zgaruvchan yuklama sharoitlarida energiya sarfini optimallashtirish qobiliyati, noaniq mantiqning murakkab va noaniq tizimlarni boshqarishdagi moslashuvchanligi hamda SCADA tizimlarining real vaqtda monitoring va masofadan boshqaruv imkoniyatlarini ta'kidlaydi. Nazariy modelashtirish, amaliy ma'lumotlar va texnik-iqtisodiy tahlil asosida ko'rsatilganki, taklif qilingan yechimlar energiya sarfini 20-45% ga kamaytirish, tizimning ishonchligini oshirish va uskuna xizmat muddatini uzaytirish imkonini beradi. Ishda integratsiyalangan texnologiyalarni joriy qilish bo'yicha amaliy tavsiyalar berilgan va ularning nasos stansiyalarini avtomatlashtirish va optimallashtirishdagi potentsiali ta'kidlangan.

Usul va materiallar. Ushbu tadqiqot mavjud ilmiy manbalar, texnik hisobotlar va xalqaro tajribalar tahliliga asoslangan. Adabiyotlarda keltirilgan natijalar solishtirildi, nasos tizimlari samaradorligi bo'yicha umumlashtirilgan ko'rsatkichlar hisoblab chiqildi va ular integratsiyalashgan boshqaruv yondashuvlari bilan qiyoslandi.

Natijalar. O'tkazilgan tahlillar shuni ko'rsatdiki, NM, ChO' va SCADA integratsiyasi an'anaviy boshqaruvga nisbatan energiya sarfini 35-40% gacha kamaytiradi, tizim samaradorligini 70% dan 75-80% gacha oshiradi hamda ekspluatatsiya xarajatlarini sezilarli qisqartiradi.

Xulosa. Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, nasos stansiyalarida NM, ChO' va SCADA integratsiyasi energiya samaradorligini oshirishning eng samarali yondashuvi hisoblanadi. Bu tizim energiya sarfini kamaytiradi, FIKni yaxshilaydi va ekspluatatsiya xarajatlarini qisqartiradi. Integratsiyalangan boshqaruv suv ta'minoti tizimlarida barqarorlik va tejamkorlikni ta'minlashda muhim ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: chastotali boshqaruv, noaniq mantiq, SCADA, energiya tejash, avtomatlashtirish.

Дата поступления: 01.04.2026. После обработки: 04.04.2026 Принято печать: 22.06.2026

For citation: Nabiev M.B. Modern Approaches to Optimization of Pumping Stations: Variable Frequency Control and Intelligent Systems. *Alternative energy*. 2026. 2(23). pp. 137-150. (In Uz)

УДК 621.34; 62-523

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ:
ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Набиев Муслим Ботир угли

<https://orcid.org/0009-0001-2625-2332> e-mail: nabiyevmuslim899@gmail.com

Институт проблем энергетики АН РУз, г.Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Статья посвящена комплексному анализу современных подходов к повышению энергоэффективности насосных станций, в которой рассматривается



интеграция частотных преобразователей, алгоритмов нечеткой логики и SCADA-систем. В исследовании подчеркиваются возможности частотного управления по оптимизации энергопотребления в условиях переменной нагрузки, адаптивность нечеткой логики при управлении сложными и неопределенными процессами, а также возможности SCADA-систем по мониторингу и дистанционному управлению в реальном времени. На основе теоретического моделирования, практических данных и технико-экономического анализа показано, что предлагаемые решения позволяют снизить энергопотребление на 20–45%, повысить надежность системы и продлить срок службы оборудования. В работе даны практические рекомендации по внедрению интегрированных технологий и подчеркнут их потенциал в автоматизации и оптимизации насосных станций.

Методы и материалы. Данное исследование основано на анализе существующих научных источников, технических отчетов и международного опыта. Сопоставлены результаты, приведенные в литературе, обобщены показатели энергоэффективности насосных систем и проведено их сравнение с интегрированными подходами управления.

Результаты. Проведенный анализ показал, что интеграция нечеткой логики, частотных преобразователей и SCADA-систем по сравнению с традиционным управлением позволяет снизить энергопотребление до 35–40%, повысить эффективность системы с 70% до 75–80%, а также существенно сократить эксплуатационные расходы.

Заключение. Результаты исследования показывают, что интеграция нечеткой логики, частотных преобразователей и SCADA-систем является наиболее эффективным подходом к повышению энергоэффективности насосных станций. Такая система снижает энергопотребление, улучшает КПД и уменьшает эксплуатационные расходы. Интегрированное управление имеет важное значение для обеспечения устойчивости и экономичности систем водоснабжения.

Ключевые слова: частотное управление, нечеткая логика, SCADA, энергосбережение, автоматизация.

UDC 621.34; 62-523

NABIEV M.B. MODERN APPROACHES TO OPTIMIZATION OF PUMPING STATIONS: VARIABLE FREQUENCY CONTROL AND INTELLIGENT SYSTEMS

Nabiyev Muslim Botir ugli

<https://orcid.org/0009-0001-2625-2332> e-mail: nabiyevmuslim899@gmail.com

Institute of Energy Problems, Academy of Sciences of Uzbekistan, Tashkent, Uzbekistan

Abstract. The article is devoted to a comprehensive analysis of modern approaches to improving the energy efficiency of pumping stations, focusing on the integration of variable frequency drives (VFDs), fuzzy logic algorithms, and SCADA systems. The study emphasizes the ability of variable frequency control to optimize energy consumption under variable load conditions, the adaptability of fuzzy logic in controlling complex and uncertain systems, and the real-time monitoring and remote-control capabilities of SCADA systems. Based on theoretical modeling, practical data, and techno-economic analysis, it is shown that the proposed solutions can reduce energy consumption by 20–45%, increase system reliability, and extend equipment service life. The paper provides practical recommendations for the implementation of integrated technologies and highlights their potential in the automation and optimization of pumping stations.

Methods and Materials. This study is based on the analysis of existing scientific sources, technical reports, and international experience. Results presented in the literature were compared, generalized indicators of pumping system efficiency were calculated, and their performance was evaluated against integrated control approaches.

Results. The analysis showed that the integration of fuzzy logic, VFDs, and SCADA systems, compared to traditional control, can reduce energy consumption by up to 35–40%, increase system efficiency from 70% to 75–80%, and significantly reduce operating costs.

Conclusion. The results of the study indicate that the integration of fuzzy logic, VFDs, and SCADA systems is the most effective approach to improving the energy efficiency of pumping stations. Such a system reduces energy consumption, improves overall efficiency, and decreases operating costs. Integrated control plays an important role in ensuring the stability and cost-effectiveness of water supply systems.

Keywords: variable frequency control, fuzzy logic, SCADA, energy saving, automation.

Kirish.

An'anaviy boshqaruv usullari (masalan, yoqish/o'chirish va PID regulyatorlar) nasoslar ish rejimining doimiy o'zgarib turadigan real sharoitlariga moslasha olmaydi. Bu esa ortiqcha energiya sarfini, nasoslar va quvurlar eskirishini, tizim barqarorligining pasayishini keltirib 30-40 % ga moslasha oluvchi, moslashuvchan (adaptiv) boshqaruv algoritmlarini joriy etish bo'yicha keng ko'lamli izlanishlar olib borilmoqda.

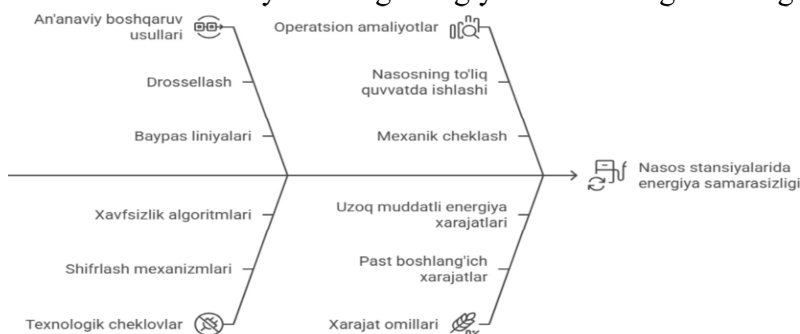
Xususan, noaniq mantiq (NM) asosidagi boshqaruv tizimlari inson ekspert baholari, tajriba ma'lumotlari asosida qaror qabul qilishni ta'minlaydi. Bunday yondashuvlar klassik matematik modellarga tayanmaydi, bu esa tizimda noaniqlik, kechikishlar va o'zgaruvchan yuklamalar mavjud bo'lganda ham barqaror ishlashga imkon yaratadi. ChO' (Chastota o'zgartirgich) texnologiyasi esa nasos elektr nasoslarining aylanish chastotasini silliq ravishda boshqarish imkonini berib, oqim va bosimni real ehtiyojga moslashtiradi. Bunday yechimlar SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) tizimlari bilan birgalikda qo'llanilganda esa nasos stansiyalari ish rejimining to'liq monitoringi va masofaviy boshqaruvi ta'minlanadi.

2010-2024-yillar oralig'ida chop etilgan ilmiy ishlanmalar tahlili shuni ko'rsatadiki, nasos tizimlarida NM asosidagi boshqaruv ChO' yordamida energiyani tejash darajasini oshiradi, tizimga yuklamalarni kamaytiradi va uskunalar ekspluatatsiya muddatini uzaytiradi. Ayniqsa, noaniq algoritmlarning SCADA tizimiga integratsiyasi orqali nafaqat avtomatlashtirish, balki intellektual monitoring va muammoli holatlarni erta aniqlash imkoniyati yaratilmoqda.

Mazkur tadqiqot sohada olib borilgan ilg'or ilmiy ishlanmalarni tizimli ravishda ko'rib chiqib, ularning natijalarini o'zaro uyg'unlik va mantiqiy ketma-ketlik asosida tahlil qiladi hamda samarali boshqaruv strategiyalariga oid ilmiy asoslangan takliflarni ishlab chiqadi. Ushbu yondashuv orqali ish nafaqat nazariy bilimlarni boyitish va ilmiy konsepsiyani rivojlantirishga, balki amaliy tizimlarda ularni qo'llashning samarali mexanizmlarini aniqlash hamda metodik ko'rsatmalarni ishlab chiqishga yo'naltirilgan.

Nasos stansiyalarini boshqarish yondashuvlarining tizimli tahlili

Suv ta'minoti va sanoat sohalarida keng qo'llaniladigan nasos stansiyalarini boshqarish samaradorligi ularning texnologik va energetik ko'rsatkichlariga bevosita ta'sir qiladi. Nasos tizimlarini boshqarishda an'anaviy yondashuvlar, jumladan, drossellash va baypas liniyalari (ortiqcha oqimni aylanishga qaytarish) keng qo'llanilgan. Bu usullar konstruktiv jihatdan oddiy va past boshlang'ich xarajatlarga ega bo'lib, ular energiya tejamkorligi nuqtai nazaridan samarasiz hisoblanadi [1]. 1-rasmda nasos stansiyalarining energiya samarasizligi keltirilgan.



1-rasm. Nasos stansiyalarini boshqarishda energiya samarasizligi.



Zamonaviy boshqaruv yondashuvlari esa asosan ChO'lar asosida ishlaydi. Bu usulda nasosning aylanish tezligi real vaqt rejimida yuklama yoki tizim talablari asosida moslashtiriladi. Natijada oqim sarfi va bosimni bevosita motor tezligini boshqarish orqali optimal darajada ushlab turish mumkin bo'ladi. Bu yondashuv energiya tejamkorligi, tizimning moslashuvchanligi va avtomatlashtirish imkoniyatlari nuqtai nazaridan yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Ayniqsa, SCADA tizimlari bilan integratsiya qilingan holatda chastotali rostlash yanada aqlli va tarmoqqa moslashgan holga keladi.

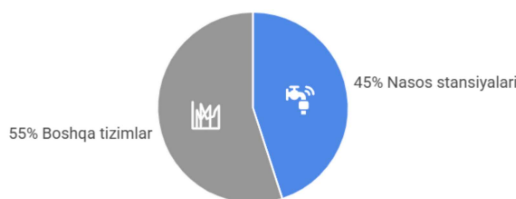
Tizimni boshqarishda yana bir muhim jihat - bu boshqaruv obyektining o'zi: ya'ni bitta nasos yoki nasoslar guruhi. Bitta nasosni boshqarish oddiy bo'lib, asosan ma'lum bir oqim yoki bosimni saqlashga qaratilgan bo'ladi. Ammo ko'p nasosli stansiyalarda guruhli boshqaruv talab etiladi, bu esa yuklama taqsimoti, zaxira rejimlari va optimallik masalalarini yechishni taqozo etadi. Guruhni optimal boshqarish uchun algoritmik yondashuvlar, jumladan, NM, sun'iy intellekt va real vaqtli monitoring tizimlari katta ahamiyatga ega bo'lmoqda. Bu usullar yordamida tizim faqat talabga mos ishga tushiriladi yoki o'chiriladi, bu esa nafaqat energiya tejashiga, balki nasoslar xizmat muddatining uzayishiga ham olib keladi.

Shuningdek, tizimlar sath, bosim yoki oqim parametrlariga asoslangan boshqaruv strategiyalariga ajratiladi. Masalan, suv minoralarida sath asosida boshqaruv eng ko'p qo'llaniladi, bu esa rezervuardagi sathga qarab nasoslarni avtomatik ishga tushirish yoki to'xtatishga asoslangan. Oqim yoki bosim asosida boshqaruv esa magistral quvurlarda yoki sanoat tizimlarida talabga mos bosimni ushlab turish uchun keng qo'llaniladi. Har bir yondashuv o'ziga xos jihatlarga ega va maqsadli tizim talablari asosida tanlanadi.

Yuqoridagi tahlil shuni ko'rsatadiki, nasos stansiyalarining samarali ishlashi uchun an'anaviy yondashuvlar o'rni zamonaviy, intellektual boshqaruv tizimlari bosib bormoqda. Bu esa energiya sarfini kamaytirish, tizim ishonchligini oshirish va uzluksiz xizmat ko'rsatishni ta'minlash uchun muhim ahamiyat kasb etadi.

Nasos stansiyalarining energiya sarfi va boshqaruv zarurati

Suv ta'minoti, irrigatsiya, kanalizatsiya va sanoat tizimlarida ishlatiladigan nasos stansiyalari odatda barcha tizimlarning 30-60% gacha energiya sarfini tashkil etadi [2]. Bu stansiyalar ko'pincha bir necha motorlar va nasoslardan tashkil topgan bo'lib, har bir nasosning samaradorligi, yuklanish va oqim talabiga bog'liq ravishda o'zgarib turadi. 2-rasmda nasos stansiyalarining energiya ulushi keltirib o'tilgan.



2-rasm. Nasos stansiyalarining energiya sarfi ulushi.

An'anaviy boshqaruv usullari - yoqish/o'chirish tizimi, qo'lda boshqariladigan valflar yoki statik tezlik regulyatorlari real ishlash sharoitlariga moslasha olmaydi. Natijada, ortiqcha energiya sarfi, tizimdagi bosim o'zgarishlari, va nasoslarning ortiqcha eskirishi kuzatiladi. Shu sababli, nasos stansiyalarining dinamik holatlarda, real vaqtda optimallashtirilgan boshqaruv tizimiga ehtiyoji mavjud.

An'anaviy boshqaruv usullari o'zining texnik imkoniyatlari bilan zamonaviy talablarni qondira olmaydi. Bunday yondashuv energiya samaradorligi past bo'lishi, nasos uskunalarning tez eskirishi va gidravlik zarbalarning kuchayishi kabi salbiy oqibatlarga olib keladi. Shu sababli, keyingi bosqichda nasos stansiyalarida qo'llanilayotgan ilg'or yechimlardan biri-chastota o'zgartirgichlar (ChO') texnologiyasi keng ko'rib chiqiladi.

Chastota o'zgartirgich (ChO') texnologiyasining nazariy asoslari

Chastotali rostlash- elektr motorlar tezligini rostlash orqali nasoslarning ish faoliyatini oqim, bosim yoki balandlik talabiga mos ravishda avtomatik tarzda sozlash imkonini beruvchi



texnologiyadir. Mazkur texnologiya nafaqat motor tezligini boshqarish, balki gidravlik parametrlarning funksional bog‘liqligini ham aniqlab beradi. Chunki nasoslarning ish xarakteristikasi motor aylanish tezligi bilan uzviy bog‘liq bo‘lib, oqim, napor va quvvat mos ravishda quyidagi tenglamalar orqali ifodalanadi.

Qo‘shimcha ko‘rsatkichlar bo‘yicha:

Oqim $Q \sim n$, Bosim balandligi $H \sim n^2$, Quvvat $P \sim n^3$,

bu yerda n - motor aylanish tezligi.

Nasos tizimlarida oqim va bosim balandligini boshqarishning ikki asosiy usuli drossellash va ChO‘ energiya samaradorligi va texnik xizmat muddati bo‘yicha sezilarli farqlarga ega. 1-jadvalda nasos tizimida drossellash va chastotali rostlash usullarining samaradorlik jihatidan solishtirilishi keltirilgan

1-jadval

Ko‘rsatkich	Drossellash	ChO‘ yordamida rostlash
Quvvat sarfi (nominal)	100%	50%
Oqim nazorati aniqligi	Past	Yuqori
Xizmat muddati	O‘rtacha	Uzaytirilgan

Keltirilgan jadval asosida tezlikni 20% ga kamaytirish natijasida quvvat sarfi ~50% gacha kamayadi [3].

Chastotali boshqaruvning asosiy afzalliklari:

- Elektr energiyasini tejash (20–35%) [3, 4].
- Nasosni silliq ishga tushirish va to‘xtatish rejimida boshqarish.
- Tezlikni silliq va doimiy sozlash imkoniyati.
- Quvurlar tizimida zarba bosimlarni kamaytirish.

Shu tarzda chastotali rostlash texnologiyasi nasos stansiyalarida energiya samaradorligini sezilarli oshirishi mumkin bo‘lsa-da, u barcha holatlarda optimal boshqaruvni to‘liq ta’minlay olmaydi. Ayniqsa, tizim parametrlarida noaniqliklar mavjud bo‘lganda yoki yuklama tez o‘zgarib turadigan sharoitlarda qo‘shimcha intellektual yondashuvlarga ehtiyoj seziladi. Nasos tizimlari boshqaruvida noaniq mantiq boshqaruvi muhim rol o‘ynaydi.

Noaniq mantiq (NM) boshqaruvi

Noaniq mantiq – klassik “ha/yo‘q” tizimidan farqli ravishda, insoniy tafakkurga yaqin, oraliq qarorlarni qabul qila oladigan algoritm asosidir. NM tizimlari asosan 4 bosqichdan iborat:

1. Fuzzifikatsiya – aniq kirish qiymatlarini lingvistik o‘zgaruvchilarga aylantirish (masalan: “yuqori bosim”, “o‘rta oqim”).

2. Qoidalar bazasi – “Agar... bo‘lsa, unda...” shaklidagi ekspert qoidalari (masalan: *agar bosim yuqori bo‘lsa va oqim past bo‘lsa – tezlikni kamaytir*).

3. Inferens mexanizmi – kirish qiymatlariga qarab kerakli qoidalarini tanlash.

4. Defuzzifikatsiya – natijani raqamli signalga aylantirib, ChO‘ga yuborish.

Foydalanilgan metodlar:

- Mamdani, Sugeno, Takagi-Sugeno usullari
- Uchburchak, qo‘ng‘irsoxta, Gauss funksiyalar asosida a‘zolik funksiyalari
- MATLAB/Simulink, LabVIEW, FuzzyTech dasturiy vositalar orqali modellash

Boshqaruv tizimlarida PID va NM algoritmalarining ishlash xususiyatlari, moslashuvchanlik darajasi va amalga oshirish murakkabligi bir-biridan sezilarli darajada farq qiladi. 2-jadvalda PID va NM yondashuvlarining asosiy ko‘rsatkichlari keltirilgan.

2-jadval

Ko‘rsatkich	PID	NM
Moslashuvchanlik	Past	Yuqori
Sozlash murakkabligi	Yuqori	O‘rtacha
Raqamli amalga oshirish	Oson	O‘rtacha
Gibrid amalga oshirish imkoniyati	Cheklangan	Yuqori (Fuzzy-PID)

Amalga oshirish:



- PLK (Programmable Logic Controller) yoki SCADA tizimi orqali o'rnatilishi mumkin.
- Aksar hollarda ChO'ning ichki boshqaruvchisi bilan integratsiya qilinadi.

NM tizimlari ayniqsa quyidagi holatlarda ustunlik ko'rsatadi:

- Noaniq, o'zgaruvchan ish sharoitlari (yuklamalar, oqim, bosim)
- Sensor xatoliklari va kechikishlar mavjud bo'lsa
- Katta tajriba va ekspert baholarga tayanadigan tizimlar

NM asosida ishlab chiqilgan boshqaruv algoritmlari o'z-o'zidan samarali bo'lib, ularning to'liq imkoniyatlarini namoyon etish uchun keng qamrovli monitoring va axborot almashinuvi zarur bo'ladi. Chunki NM tizimlari real vaqt rejimida o'zgaruvchan parametrlar asosida qaror qabul qilishi uchun ishonchli ma'lumot oqimiga tayanadi. Shu nuqtai nazardan qaralganda, ushbu algoritmlarni yuqori darajadagi nazorat va ma'lumot yig'ish tizimlari - SCADA platformalari bilan integratsiya qilish texnologik jarayonni sezilarli darajada boyitadi [22].

SCADA tizimi va uning nasos stansiyalaridagi roli

SCADA - real vaqtda tizimni kuzatish, ma'lumot yig'ish, signalizatsiya va masofadan boshqaruv uchun mo'ljallangan avtomatlashtirish platformasidir.

SCADA tizimi odatda quyidagi komponentlardan tashkil topadi:

- RTU/PLC - joylardagi fizik qurilmalarni boshqaruvchi tugunlar
- SCADA server – ma'lumot yig'uvchi va tahlil qiluvchi asosiy tugun
- HMI – operator interfeysi (grafik oynada oqim, bosim, signalizatsiya ko'rinadi)
- Ma'lumotlar bazasi – tarixiy ma'lumotlarni saqlovchi component

Nasos tizimlarida SCADAning foydali jihatlari:

- Nasoslar va dvigatellar holatini real vaqtda kuzatish
- Avtomatik ishga tushirish/to'xtatish, uzilishlar haqida ogohlantirish
- Noaniq boshqaruv algoritmlari integratsiyasi uchun ochiq platforma (Modbus, OPC, Ethernet)

Shu tarzda, ChO', NM algoritmlari va SCADA tizimlarining o'zaro uzviy bog'liqligi, samarali va moslashuvchan boshqaruv tizimlarini yaratish uchun nazariy poydevor bo'lib xizmat qiladi.

Nasos tizimlari uchun zamonaviy yondashuvlar integratsiyasi

So'nggi o'n yillikda suv nasos stansiyalarini boshqarishda energiya tejamkorlikni oshirish bo'yicha ko'plab ilmiy izlanishlar olib borilgan. Bu tadqiqotlarda ChO' tizimlari NM algoritmlari va SCADA tizimlarining integratsiyasi asosiy yo'nalish sifatida ilgari surilgan.

Dastlabki yondashuvlar

2010–2014-yillarda ChO' texnologiyasining nasos stansiyalariga qo'llanilishi bo'yicha birinchi amaliy tadqiqotlar boshlangan. Xususan:

Ushbu tadqiqotda [1] suv nasos tizimlarida ChO' texnologiyasining qo'llanilishi tahlil qilingan. Asosiy e'tibor nasos motorlarining aylanish tezligini real yuklama va suv ta'minoti talabiga moslashtirish orqali energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan. Natijalar shuni ko'rsatdiki, nasoslarni ChO' yordamida boshqarish 20-25% gacha elektr energiyasini tejash imkonini beradi

Li X va Chen Y ning. Suv taqsimlash tizimlarida o'zgaruvchan tezlikli nasoslarni boshqarish bo'yicha olib borilgan [2] ushbu tadqiqotda mualliflar asosiy e'tiborni tizim parametrlarining doimiy o'zgaruvchanligi sharoitida barqarorlik va javob tezligini ta'minlashga qaratgan. An'anaviy PID regulyatorlar bunday sharoitlarda yetarlicha samarali ishlay olmasligi sababli, maqolada adaptiv PID boshqaruv algoritmi taklif etilgan. Ushbu usulning mohiyati shundaki, regulyatorning koeffitsiyentlari real vaqt rejimida tizimning hozirgi holatiga moslashtiriladi va shu orqali optimal boshqaruv ta'minlanadi. Natijalar shuni ko'rsatdiki, adaptiv PID boshqaruvi yordamida tizimning javob tezligi oshgan, bosim tebranishlari kamaygan hamda nasoslarning ortiqcha yuklanishi sezilarli darajada qisqargan. Mexanik eskirish sur'atining pasayishi tizimning xizmat muddatini uzaytirish imkonini bergan. Energiya samaradorligi bo'yicha aniq foiz ko'rsatkichlari keltirilmagan bo'lsa-da, tizimning dinamik barqarorligi va samaradorligi ortgani sababli bilvosita energiya tejallishi qayd etilgan.



Bu davrda SCADA tizimlari asosan monitoring va ma'lumot yig'ish uchun ishlatilgan bo'lib, NM elementlari hali to'liq integratsiyalashmagan.

Algoritmik yondashuvlarning paydo bo'lishi

Bu bosqichda algoritmik modellashtirishga qiziqish ortdi:

Ushbu tadqiqotda [5] Kumar A va Singh R lar nasos stansiyalarida energiya samaradorligini oshirish uchun NM va ChO' kombinatsiyasini qo'llashni taklif qilgan. Tadqiqotning asosiy ilmiy yangiligi shundaki, klassik PID asosidagi boshqaruvdan farqli ravishda, NM algoritmi tizimdagi chiziqli bo'lmagan va noaniq o'zgarishlarga moslashuvchan yechim bera oladi. Ayniqsa, yuklama sharoitlarining tez-tez o'zgarishi va gidravlik parametrlarning murakkab dinamikasini hisobga olishda NM samarali ishlashi ta'kidlangan. Tizim MATLAB/Simulink muhitida modellashtirilgan bo'lib, NM-ChO' integratsiyasi asosida nasosning tezligi va bosim ko'rsatkichlari real vaqt rejimida optimallashtirilgan. Modellashtirish natijalari shuni ko'rsatadiki, an'anaviy boshqaruvga nisbatan energiya sarfi o'rtacha 12% gacha kamaygan, tizimning barqarorlik darajasi oshgan va bosim tebranishlari sezilarli darajada qisqargan.

Chen S va boshqalar tomonidan olib borilgan ushbu ilmiy maqolada [6] suv ta'minoti tizimlarida keng qo'llaniladigan nasos stansiyalarini boshqarishda PID va NM asosidagi algoritmlar samaradorligi qiyosiy tahlil qilingan. Tadqiqotning asosiy maqsadi - o'zgaruvchan yuklama sharoitida nasos tizimining barqarorligini ta'minlash va energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan. Mualliflar dastlab an'anaviy PID boshqaruvchilarning afzallik va cheklovlarini ko'rib chiqishadi. Ularning xulosasiga ko'ra, PID algoritmi oddiy struktura va keng amaliyotda qo'llanilishi bilan ahamiyatli bo'lib, yuklamaning keskin o'zgarishlariga moslashishda sezilarli qiyinchiliklarga duch keladi. Masalan, nasos tizimida oqim yoki bosimda kutilmagan o'zgarishlar kuzatilganida, PID regulyatori kechikishlar va ortiqcha tebranishlarni yuzaga keltiradi. Bu esa tizim samaradorligini pasaytiradi va ortiqcha energiya sarfini keltirib chiqaradi. Shu nuqtai nazardan, tadqiqotda noaniq boshqaruv usuli joriy etilib, uning natijalari PID bilan solishtiriladi. Noaniq algoritmi inson tafakkuriga yaqin yondashuv asosida "aniq emas" parametrlarni baholash orqali qarorlar qabul qiladi. Tadqiqot natijalarida noaniq boshqaruv tizimi yuklamaning o'zgaruvchan sharoitlariga tezroq moslashishi, bosim va oqimdagi tebranishlarni kamaytirishi hamda gidravlik barqarorlikni yaxshilashi isbotlangan. Bundan tashqari, noaniq tizimidan foydalanish natijasida energiya sarfi ham kamaygani qayd etilgan. Mualliflar alohida ta'kidlashadiki, noaniq boshqaruv tizimlari ayniqsa real vaqt rejimida ishlovchi, yuklamasi tez-tez o'zgarib turadigan nasos stansiyalari uchun samarali yechim hisoblanadi. Biroq, ular amalga oshirish murakkabligi, ya'ni, algoritmnin ishlab chiqishda yuqori darajadagi mutaxassislik va qo'shimcha hisoblash resurslarini talab qilishi haqida ham ogohlantiradilar.

Alavi H va boshqa olimlar tomonidan olib borilgan maqolada [7] suv ta'minoti tizimlarida energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan aqlli boshqaruv yondashuvlarini tahlil qiladi. Tadqiqotning markazida NM asosidagi boshqaruv algoritmlari turib, ularning asosiy xususiyati - tizim parametrlarining sezgirlik darajasiga mos ravishda nasos motorining chastotasini avtomatik rostdash imkoniyatini berishi bilan izohlanadi. Mualliflar birinchi navbatda an'anaviy boshqaruv usullarining kamchiliklarini qayd etadilar: qat'iy qoidalarga asoslangan tizimlar tez-tez yuklamaning dinamik o'zgarishlariga javob bera olmaydi, bu esa ortiqcha energiya sarfi va gidravlik beqarorlikka olib keladi. Shundan kelib chiqib, ular NM qoidalarini asosida ishlab chiqilgan intellektual boshqaruv modelini taklif qiladilar. Ushbu modelda noaniq qoidalar real vaqt ma'lumotlari (oqim, bosim, talab darajasi)ga asoslanib chastotani optimal darajaga moslashtiradi. Bunda tizimning asosiy ustunligi shundaki, u "ha/yo'q" tipidagi qattiq chegaralardan ko'ra, oraliq qarorlarni qabul qilishga qodir. Natijada, nasosning tezligi faqat zarur bo'lgan paytda oshiriladi yoki kamaytiriladi, bu esa energiya sarfini kamaytiribgina qolmay, nasos va quvur elementlarining mexanik yuklanishini ham pasaytiradi. Tadqiqotda o'tkazilgan simulyatsiya va eksperimental tahlillar shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan tizim yordamida suv ta'minoti jarayonida 20-30% gacha energiya tejallishi mumkin. Bundan tashqari, tizim yuklamaning keskin o'zgarishlariga tezroq moslashadi va suv bosimidagi tebranishlarni minimallashtiradi. Mualliflar ushbu yondashuvning yana bir muhim jihatini alohida ta'kidlashadi: tizim skalabillik xususiyatiga ega bo'lib, kichik suv



ta'minoti tarmoqlaridan tortib yirik shaharlardagi nasos stansiyalarigacha qo'llanilishi mumkin. Shu bilan birga, ularni joriy etishda dasturiy ta'minot va sensorlar aniqligiga bo'lgan talabning yuqoriligi, shuningdek, mutaxassislar ishtirokini taqozo etishi kabi amaliy muammolar ham qayd etilgan.

SCADA tizimlari hali to'liq bog'lanmagan, biroq natijalar energiya samaradorligida sezilarli yaxshilanish (8–12%) bergan.

Integratsiyalashgan tizimlar yondashuvi

SCADA bilan real vaqtda aloqa qilish imkoniyati integratsiyalashgan tizimlarning asosini tashkil eta boshladi:

Ushbu maqolada [8] suv ta'minoti tizimlarida energiya samaradorligini oshirish va gidravlik barqarorlikni ta'minlash maqsadida SCADA, NM boshqaruv va ChO' texnologiyalarining integratsiyasini o'rganadi. Tadqiqotda SCADA tizimi real vaqt rejimida bosim va oqim datchiklaridan ma'lumotlarni yig'ib, ushbu signallarni NM boshqaruv tizimiga uzatadi. NM algoritmi kelib tushgan ma'lumotlarga asoslanib nasos motorining chastotasini dinamik optimallashtiradi, natijada energiya sarfi sezilarli darajada kamayadi va suv taqsimoti yanada barqaror bo'ladi. Mualliflarning kuzatuvlariga ko'ra, NM-ChO' boshqaruvining SCADA bilan birgalikda ishlatilishi tizimning yuklamadagi keskin o'zgarishlarga moslashuvchanligini oshirgan hamda bosimning keskin tebranishlarini minimallashtirgan. Shuningdek, nasoslarning xizmat muddati uzaygani va texnik xizmat ko'rsatish xarajatlari kamaygani qayd etilgan. SCADA va NM-ChO' integratsiyasi nasos stansiyalarini aqlli, moslashuvchan va energiya tejankor qilishda samarali yondashuv ekanini ko'rsatadi.

Patel M va Rao D tomonidan yozilgan maqolada [9] ko'p nasosli suv ta'minoti tarmoqlarini boshqarishda SCADA va noaniq algoritmlarning integratsiyasi o'rganilgan. Tadqiqotda asosiy e'tibor nasoslarni parallel rejimda ishlatishda yuzaga keladigan muammolarga - energiya sarfining yuqoriligi, bosim tebranishlari va nasoslar o'rtasidagi yuklamaning notekis taqsimlanishiga qaratilgan. Mualliflar SCADA tizimi yordamida real vaqt rejimida oqim va bosim ma'lumotlarini yig'ib, noaniq algoritmlar asosida nasoslarning ish tartibini optimallashtirish mexanizmini ishlab chiqqan. Ushbu yondashuv natijasida tizimdagi nasoslar o'rtasida yuklama muvozanati yaxshilanib, energiya sarfi 15-20% gacha qisqargan, suv taqsimotidagi bosim esa barqarorlashgan. Tadqiqot natijalari ko'rsatadiki, SCADA-NM asosidagi boshqaruv modeli nafaqat energiya samaradorligini oshiradi, balki tizimning ishonchliligi va chidamliligini ham ta'minlaydi. Ayniqsa, ko'p nasosli tarmoqlarda ushbu yondashuv an'anaviy usullarga nisbatan sezilarli ustunlik ko'rsatgan. SCADA va NM integratsiyasi yirik suv ta'minoti tarmoqlarida optimal boshqaruvni ta'minlashda dolzarb va samarali yechim ekanligini ilmiy jihatdan asoslab beradi.

Liu Y va boshqalar tomonidan olib borilgan ushbu maqolada [10] shahar suv ta'minoti tarmoqlarida energiya samaradorligini oshirish va barqaror ta'minotni kafolatlash uchun NM-PID boshqaruv va SCADA tizimi integratsiyasi tadqiq qilingan. Maqolada avvalo an'anaviy PID regulyatorlarining imkoniyatlari va cheklovlari ko'rsatib o'tiladi. Xususan, oddiy PID algoritmlari yuklamaning o'zgaruvchanligi, gidravlik kechikishlar va datchiklar xatoliklari sharoitida optimal boshqaruvni ta'minlay olmaydi. Shu sababli mualliflar PIDning klassik tuzilmasiga NM qoidalarini qo'shib, uni adaptiv xarakterga ega qiluvchi NM-PID modelini ishlab chiqishgan. Ushbu model tizim parametrlarini real vaqt rejimida moslab boradi va sozlashdagi murakkabliklarni avtomatik tarzda yumshatadi. SCADA tizimi esa mazkur boshqaruv strukturasi "asab tizimi" sifatida ishlatilgan. U orqali bosim, oqim va energiya sarfi bo'yicha real vaqt ma'lumotlari yig'ilib, NM-PID algoritmgiga uzatilgan. Shu asosda nasoslarning tezligi moslashtirilgan va ortiqcha energiya sarfi hamda bosim tebranishlari kamaytirilgan. Olib borilgan amaliy sinovlar natijasida SCADA bilan integratsiyalangan NM-PID tizimi energiya sarfini 10–18% gacha qisqartirgani, suv taqsimotidagi bosimni esa yanada barqaror holatga keltirgani qayd etilgan. Bundan tashqari, tizimning barqaror ishlashi tufayli avariyaaviy to'xtashlar soni kamaygan va xizmat muddati uzaygan. Mazkur izlanish shahar suv ta'minoti tarmoqlarida NM-PID boshqaruvi SCADA bilan birgalikda qo'llanganda an'anaviy PID yechimlariga nisbatan yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. U



nafaqat energiya tejamkorligini oshiradi, balki tizimning moslashuvchanligi va chidamliligini kuchaytiradi.

Zamonaviy ilgʻor yondashuvlar

Soʻnggi yillarda sunʼiy intellekt yondashuvlari integratsiyalashgan fuzzy-SCADA tizimlarga yangi yunalish ochdi:

Ahmed A va boshqa olimlarning ushbu maqolasida [11] zamonaviy nasos stansiyalarida energiya samaradorligini oshirish va tizimning uzluksiz barqaror ishlashini taʼminlash uchun gibridd boshqaruv yondashuvlarini chuqur oʻrganishga bagʻishlangan. Maqolada avvalo anʼanaviy NM tizimlarning imkoniyatlari va cheklovlari muhokama qilinadi. NM algoritmlari murakkab va noaniq sharoitlarda samarali ishlay olsa-da, ularda qoidalar sonining ortishi va parametrlarni aniqlashdagi subʼektivlik tufayli maʼlum cheklovlar mavjud. Shu nuqtai nazardan mualliflar NMni mashina oʻrganish (MOʻ) metodlari bilan birlashtirgan. Natijada tizim oʻzini-oʻzi oʻrgana oladigan, yaʼni real vaqt rejimida yuklama, oqim va bosim oʻzgarishlariga moslashuvchi gibridd boshqaruv modeli ishlab chiqilgan. Boshqaruv tizimining “asabi” sifatida SCADA platformasi tanlangan. U orqali barcha sensorlardan (bosim, oqim, energiya sarfi, vibratsiya) olingan maʼlumotlar markaziy boshqaruv tizimiga uzatiladi. Maʼlumotlar dastlab NM algoritmlar bilan qayta ishlanib, soʻngra mashina oʻrganish modeli yordamida optimallashtiriladi. Bunda tizim vaqt oʻtishi bilan oʻz tajribasidan “oʻrganadi” va boshqaruv sifatini uzluksiz ravishda yaxshilab boradi. Amaliy sinovlar shuni koʻrsatdiki, gibridd NM-MOʻ boshqaruvi SCADA integratsiyasi bilan birgalikda energiya sarfini 25–32% gacha kamaytirishga, suv taqsimotidagi bosimni $\pm 3\%$ aniqlik darajasida barqarorlashtirishga, va nasoslar xizmat muddatini sezilarli darajada uzaytirishga imkon bergan. Shuningdek, tizimning oʻzgaruvchan yuklamalarga javob berish vaqti klassik fuzzy yoki PID usullariga nisbatan 2 barobar tezroq boʻlgani qayd etilgan. Ushbu tadqiqot SCADA asosidagi gibridd boshqaruv yondashuvlari kelajakdagi suv taʼminoti va energetika tizimlarida muhim rol oʻynashini koʻrsatadi. Noaniq va mashina oʻrganish metodlarining kombinatsiyasi nafaqat energiya samaradorligini oshiradi, balki tizimni oʻzini-oʻzi optimallashtiruvchi aqlli platformaga aylantiradi. Bu yondashuv klassik boshqaruv uslublariga nisbatan yangi bosqich boʻlib, nasos stansiyalarining barqarorligi, ishonchliligi va ekspluatatsion samaradorligini yuqori darajada taʼminlaydi.

Ushbu tadqiqot [12] suv taʼminoti tizimlarida energiya samaradorligini oshirish maqsadida mustaqil qaror qabul qiluvchi intellektual boshqaruv yondashuvlarini chuqur oʻrganishga qaratilgan. Maqolada mualliflar mavjud anʼanaviy PID va noaniq algoritmlarining ayrim cheklovlarini taʼkidlaydilar. Jumladan, bu tizimlar odatda oldindan belgilangan qoidalar va parametrlar asosida ishlaydi va oʻzini-oʻzi oʻrgana olmaydi. Dinamik yuklamalar va real sharoitdagi keskin oʻzgarishlarga javob berishda bunday yondashuvlar yetarli darajada samarali emasligi qayd etilgan. Shu sababli tadqiqotda reinforcement learning (RL) - yaʼni “tajribadan oʻrganishga asoslangan boshqaruv” modeli qoʻllaniladi. SCADA tizimi RL algoritmlarining “koʻzi va qulogʻi” vazifasini bajaradi. U real vaqt rejimida suv bosimi, oqim, elektr quvvati sarfi kabi asosiy parametrlarni uzluksiz yigʻib, RL agentiga uzatadi. Agent esa tizimdan kelayotgan “mukofot va jazolar” mexanizmi asosida optimal qarorlarni shakllantiradi. Masalan, energiya sarfi kamaytirilsa - bu ijobiy mukofot boʻlib xizmat qiladi, tizimda bosim yetarli darajadan pastlab ketsa esa - salbiy “jazolash” orqali algoritm keyingi safar bunday qarorni takrorlamaslikni oʻrganadi. Tajriba sinovlari shuni koʻrsatdiki, SCADA bilan integratsiyalashgan RL yondashuvi nasos stansiyalarida quvvat sarfini oʻrtacha 18% gacha kamaytirishga erishgan. Bundan tashqari, tizim yuklamadagi oʻzgarishlarga moslashish tezligi anʼanaviy noaniq yoki PID boshqaruvlariga qaraganda ancha yuqori boʻlgani taʼkidlangan. Eng muhim jihati shundaki, RL asosidagi boshqaruv doimiy inson aralashuvisiz mustaqil qaror qabul qilish qobiliyatiga ega boʻlib, tizim vaqt oʻtishi bilan yanada optimal ishlashni “oʻrganib boradi”. Ushbu maqola suv taqsimoti tizimlari uchun avtonom, oʻzini-oʻzi oʻrganuvchi boshqaruv yondashuvlarining samaradorligini isbotlaydi. SCADA platformasi bilan birgalikda qoʻllangan RL algoritmlari nafaqat energiya samaradorligini oshiradi, balki tizimni inson omilidan qisman mustaqil qilgan holda kelajakdagi aqlli nasos stansiyalari konsepsiyasiga yoʻl ochadi. Tadqiqot shuni koʻrsatdiki, kelgusida klassik noaniq yoki PID yondashuvlari RL



asosidagi aqlli boshqaruv tizimlari bilan bosqichma-bosqich to'ldirilishi yoki almashtirilishi mumkin.

Yamamoto T va Tanaka K ning maqolasida [13] nasos stansiyalarida energiya samaradorligini oshirish va tizimning barqaror ishlashini ta'minlash uchun aqlli NM asosidagi nazorat tizimi taklif etilgan. Tadqiqotning asosiy yangiligi shundan iboratki, noaniq algoritmlar oddiy reaktiv boshqaruvdan farqli ravishda oldindan taxmin qiluvchi (predictive adaptation) yondashuv bilan boyitilgan. SCADA orqali yig'ilgan real vaqt ma'lumotlari - oqim, bosim, energiya sarfi - nafaqat joriy qarorlarni qabul qilishda, balki kelajakdagi yuklama va talab o'zgarishlarini prognozlashda ham qo'llanadi. Natijada tizim o'z vaqtida moslashib, ortiqcha energiya sarfi yoki gidravlik tebranishlarning oldini olish imkoniyatiga ega bo'ladi. Natijalar shuni ko'rsatadiki, ishlab chiqilgan nazorat mexanizmi an'anaviy noaniq tizimlarga nisbatan 10-15% qo'shimcha energiya tejash, suv taqsimotidagi bosim barqarorligini sezilarli darajada yaxshilash va xizmat muddati davomida nasos eskirishini kamaytirish imkonini bergan. Mazkur maqola NMning supervisor-level qo'llanishi va uni predictive control bilan integratsiyalash istiqbollari asoslab beradi. Ushbu yondashuv urbanizatsiya sharoitida suv ta'minoti tizimlarining aqlli boshqaruv konsepsiyasiga yaqinlashayotganini yaqqol ko'rsatadi.

Tahliliy umumlashma

So'nggi o'n yillikda nasos stansiyalarida energiya samaradorligini oshirishga qaratilgan boshqaruv texnologiyalari bosqichma-bosqich rivojlanib bordi va har bir davr o'zining texnologik xususiyatlari bilan ajralib turdi.

2010–2014-yillar davrida tadqiqotlar asosan ChO' texnologiyalariga qaratildi. Bu davrda nasoslarning tezlikni rostlash orqali energiya sarfini kamaytirish imkoniyatlari tajribada isbotlandi. Shu bilan birga, SCADA va noaniq tizimlari alohida qo'llanilgan bo'lib, ularning integratsiyasi hali keng tatbiq qilinmagan edi.

2015-2018-yillarga kelib, NM algoritmlari ilmiy izlanishlarning markaziga chiqdi. Bu davrda tizimlarga adaptivlik elementlari qo'shila boshlandi, ya'ni nasoslarning ish rejimi o'zgaruvchan yuklamalarga moslashtirildi. Shuningdek, NM-ChO' kombinatsiyasi yordamida samaradorlikning oshishi matematik modellash va laboratoriya sinovlari orqali asoslab berildi.

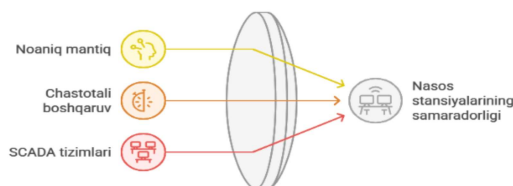
2019-2021-yillarda esa SCADA tizimlari bilan integratsiyalashuv jarayoni tezlashdi. Bu davrda nasos stansiyalarida real vaqt rejimida monitoring va boshqaruv imkoniyatlari shakllandi. Ayniqsa, SCADA orqali yig'ilgan ma'lumotlarni NM yoki PID algoritmlarga uzatish orqali tizimning tezkor javob berish qobiliyati oshirildi. Shu orqali an'anaviy boshqaruvga qaraganda sezilarli energiya tejallishi hamda gidravlik barqarorlikka erishildi.

2022–2024-yillarda rivojlanish bosqichi yangi sifat darajasiga ko'tarildi. Bu davrda sun'iy intellekt (SI) va o'zini-o'zi o'rgatuvchi algoritmlari SCADA-NM-ChO' kombinatsiyasiga qo'shildi. Natijada tizim nafaqat real vaqtda boshqarish, balki kelajakdagi yuklamalarni oldindan bashorat qilish va holatga mos ravishda optimal qaror qabul qilish imkoniyatiga ega bo'ldi. Shu yondashuv yordamida energiya tejallishi 35–40% dan yuqori bo'ldi, suv ta'minotidagi ishonchlilik va resurs samaradorligi esa yangi darajaga ko'tarildi [14].

Umumiy xulosa shuki, energiya samarador boshqaruvning zamonaviy bosqichida faqat alohida texnik vositalar (ChO', NM, SCADA) emas, balki ularning uzviy integratsiyasi muhim ahamiyat kasb etmoqda. Har bir davrda texnologiyalar bir-birini to'ldirib, yakunda aqlli, moslashuvchan va o'zini-o'zi optimallashtiruvchi tizim arxitekturasiga yo'l ochdi. Shu sababli keyingi bo'limlarda tizimning arxitekturasini, ishlash algoritmlari hamda real va simulyatsiyalangan tajriba natijalari batafsil yoritilishi zarur. Nazariy va amaliy izlanishlarning evolyutsion rivojlanishi natijasida alohida qo'llanilgan vositalardan ko'ra, ularning o'zaro uyg'unlashgan holda ishlashi samaradorlikni keskin oshirishi aniqlandi. Bunda ChO', NM algoritmlari va SCADA tizimlari o'zaro integratsiya qilinib, kompleks boshqaruv platformasi shakllantiriladi. Ushbu integratsiya nafaqat energiya tejamkorligini ta'minlaydi, balki tizimning moslashuvchanligi, ishonchlilik va barqarorligini ham yangi bosqichga olib chiqadi [14,15].

Integratsiyalangan boshqaruv tizimining samaradorligi

Nasos stansiyalarining samarali ishlashini ta'minlashda, boshqaruv tizimini ilg'or algoritmlar asosida tashkil etish muhim o'rin tutadi. Shu nuqtai nazardan qaranganda, NM, ChO' va SCADA tizimlarining integratsiyasi asosida tuzilgan boshqaruv yechimlari an'anaviy usullarga nisbatan sezilarli ustunliklar beradi.



4-rasm. Integratsiyalangan boshqaruvning ustunliklari.

Energiya sarfi bo'yicha tahlil

Ilmiy manbalardagi natijalarga tayansak, integratsiyalangan boshqaruv tizimi yordamida an'anaviy boshqaruvga nisbatan 35-40% energiya tejash imkoniyati mavjud.



5-rasm. Energiya samaradorligini oshirish.

Keltirilgan diagrammadan ko'rish mumkinki, an'anaviy boshqaruv 100 kVt·soat sarflagan bo'lsa, NM+ChO'+SCADA kombinatsiyasi bilan bu ko'rsatkich 65 kVt·soatga tushgan.

Zamonaviy boshqaruv texnologiyalarining integratsiyasi: ChO', NM va SCADA tizimlari asosida kompleks yondashuv

Nasos stansiyalarining samaradorligini maksimal darajada oshirishda alohida-alohida ishlatilayotgan texnologiyalarni o'zaro integratsiyalash muhim ahamiyat kasb etadi. ChO', NM asosidagi boshqaruv tizimlari va SCADA tizimlarining kombinatsiyasi bugungi kunda eng samarali yechimlardan biri sifatida e'tirof etilmoqda. Quyida ushbu texnologiyalar o'rtasidagi integratsiya yondashuvlari, ularning afzalliklari va cheklovlari, real hayotdagi tatbiqlari hamda arxitekturaviy yechimlari ko'rib chiqiladi [22]

ChO' + NM boshqaruvi integratsiyasi

ChO' nasos motorining aylanish tezligini uzluksiz boshqarish imkonini beradi, bu esa nasosning energiya sarfini oqim talabiga mos ravishda optimallashtiradi. Biroq, tizimda chiziqlik, parametrlarning o'zgaruvchanligi yoki noaniqliklar mavjud bo'lsa, an'anaviy PID boshqaruvchilar samarasiz bo'lishi mumkin. Bu holatda NM boshqaruvchilari, ChO'ni boshqaruvchi sifatida joriy qilinadi.

Masalan, o'zgargan yuklamalar va oqim talabiga mos ravishda ChO' chastotasi avtomatik tarzda noaniq qoidalarga asosan sozlanadi. Ramadhan va boshqa olimlar tomonidan keltirilgan tadqiqotda, NM orqali boshqariladigan ChO' tizimi an'anaviy PID tizimiga nisbatan 18–24% energiya tejashga erishgan. Bu kombinatsiya ayniqsa past yuklama sharoitida nasoslarning samarador ishlashini ta'minlaydi [13].

ChO' + SCADA tizimi integratsiyasi

SCADA tizimlari real vaqt rejimida nasos stansiyasining ish jarayonlarini kuzatish va boshqarishni ta'minlaydi. ChO' esa shu tizimga ulanib, foydalanuvchi tomonidan yoki avtomatlashtirilgan dastur orqali nazorat qilinadi. SCADA orqali ChO' parametrlarini masofadan tahrirlash, alarm holatlarda tezkor javob berish, avariyaviy sharoitlarda moslashuvchan boshqaruvni amalga oshirish mumkin.

Masalan, ABB ACQ580 yoki Siemens SINAMICS G120 singari zamonaviy ChO' lar Modbus yoki Profibus interfeyslari orqali SCADA tizimlariga ulanadi. Bu orqali oqim, bosim, quvvat, chastota haqidagi ma'lumotlar central HMI yoki web-serverlar orqali vizualizatsiya qilinadi. SCADA tizimida aniqlangan nosozliklar bo'yicha ChO' avtomatik rejimda ishlash chastotasini kamaytiradi yoki himoya rejimiga o'tadi [20,21].



NM + SCADA integratsiyasi

NM modullari PLK (programmable logic controller) ichida yoki SCADA tizimining o'zida amalga oshirilgan holatlarda, bu tizimlar qoidalarga asoslangan aqlli boshqaruvni ta'minlaydi. Bunda SCADA tizimi real vaqt ma'lumotlarini yig'adi va NM boshqaruvchilarga uzatadi. NM tizimi esa bu ma'lumotlar asosida tizimga optimal buyruq beradi.

Masalan, bosim haddan oshgan holatlarda SCADA bu holatni aniqlab, NM boshqaruvchiga xabar beradi va u ChO' chastotasini pasaytiradi. Bu yondashuv yuqori aniqlik va moslashuvchanlikni ta'minlaydi. Bu turdagi tizimlar ayniqsa sathni nazorat qilishda samarali, masalan, rezervuar yoki suv minorasida sathni optimal darajada ushlab turish uchun foydalaniladi.

ChO' + NM + SCADA — To'liq integratsiyalashgan tizim

Ushbu kompleks yondashuvda har bir texnologiya o'zining kuchli tomonlarini ko'rsatadi:

- ChO' – uzluksiz tezlik boshqaruvi,
- NM – noaniq, chiziqli bo'lmagan holatlarda intellektual qaror qabul qilish,
- SCADA – monitoring, vizualizatsiya, masofaviy boshqaruv.

Real amaliyotda bunday tizimlar, masalan, Hubei Engineering University tomonidan ishlab chiqilgan suv ta'minoti tizimida tatbiq etilgan. Ushbu tizimda SCADA orqali NMli qarorlar qabul qilinadi va ChO'lar shunga mos tarzda chastota boshqaruvini amalga oshiradi. Natijada tizimda 27% energiya tejallishi va 8% ortiqcha suv yo'qotishining oldi olingan [16].



6-rasm. Integratsiyalashgan texnologiyalar orqali samaradorlikni oshirish.

Integratsiya arxitekturası va protokollar

Nasos stansiyalarida ilg'or boshqaruv tizimini tashkil etishda qurilmalar o'rtasidagi aloqa protokollari muhim ahamiyat kasb etadi. Chunki, real vaqtli boshqaruv faqatgina texnik vositalarning mavjudligi emas, balki ularning o'zaro uzviy va standart asosida ishlashi bilan ta'minlanadi. Masalan, PLK qurilmasi NM algoritmlarini bajarish uchun xizmat qiladi va asosan Modbus TCP/RTU orqali ma'lumot almashadi. ChO' esa nasos motorining tezligini boshqaradi va odatda Profibus, CANopen yoki EtherCAT protokollari orqali tizimga ulanadi. Shu bilan birga, tizimni kuzatish va masofadan boshqaruvni amalga oshiruvchi SCADA platformasi yuqori darajadagi integratsiyani talab qiladi va OPC UA yoki Modbus TCP/IP kabi sanoat protokollari asosida ishlaydi [17].

3-jadvalda nasos stansiyasida qo'llaniladigan qurilmalar va ular bilan bog'liq asosiy protokollar keltirilgan [17].

3-jadval

Qurilma	Funksiya	Aloqa protokoli
PLK (NM)	Noaniq algoritmlarni bajarish	Modbus TCP / RTU
ChOG	Tezlikni boshqarish	Profibus, CANopen, EtherCAT
SCADA	Monitoring va masofadan boshqaruv	OPC UA, Modbus TCP/IP

SCADA – PLK – ChO' o'rtasidagi o'zaro aloqa uchun Modbus, Profibus, OPC UA kabi sanoat protokollari keng qo'llaniladi. OPC UA esa yuqori xavfsizlik va platformadan mustaqil aloqa imkonini beradi. OPC orqali PLK va SCADA o'rtasida real vaqtli ma'lumot almashish amalga oshiriladi [23, 24].

Integratsiyalangan boshqaruv yondashuvlari (NM + ChO' + SCADA) nafaqat energiya tejallishini ta'minlaydi, balki tizimni turli ish sharoitlariga moslashuvchan boshqarish imkoniyatini ham beradi. Shu bilan birga, bunday tizimlarni joriy etishda dasturiy ta'minot murakkabligi, integratsiya bosqichida xavfsizlik xatarlarining ortishi va yuqori dasturiy-apparat xarajatlari kabi omillar e'tiborga olinishi lozim. Quyidagi 4-jadvalda afzalliklar va qiyinchiliklarning umumlashtirilgan tahlili keltirilgan [16].



Afzalliklar	Qiyinchiliklar
Energiya tejalishi 25–30% gacha	Dasturlash murakkabligi
Moslashuvchan boshqaruv	Yuqori dasturiy va apparat xarajatlari
Real vaqt monitoringi	Integratsiya bosqichida xavfsizlik xatarlarining kuchayishi
Qiyin sharoitlarda barqarorlik	Mutaxassislar yetishmasligi

Nasos stansiyalarida ilg‘or boshqaruv tizimlarini joriy etishda integratsiya arxitekturasini va sanoat protokollari hal qiluvchi rol o‘ynaydi. Qurilmalar o‘rtasida uzviy va standart asosdagi aloqa — tizimning ishonchliligi, moslashuvchanligi va energiya samaradorligini belgilovchi asosiy omildir. PLK, ChO‘ va SCADA platformasining o‘zaro integratsiyasi orqali nafaqat 25-30% gacha energiya tejalishi ta‘minlanadi, balki real vaqt monitoringi va murakkab ish sharoitlarida barqaror boshqaruv ham amalga oshiriladi. Shu bilan birga, dasturlash murakkabligi, xavfsizlik xatarlarining ortishi va yuqori xarajatlar kabi omillar bu yondashuvni joriy etishda diqqat bilan hisobga olinishi zarur. Umuman olganda, NM + ChO‘ + SCADA asosidagi integratsiyalangan boshqaruv yondashuvi kelajakda nasos stansiyalarining samaradorligini sezilarli darajada oshirish imkonini beradi [18].

Xulosa. Ishda nasos stansiyalarini boshqarishning an‘anaviy va zamonaviy usullari tizimli tahlil qilindi, ChO‘, NM asosidagi boshqaruv tizimlari va SCADA platformalarini integratsiya qilish samaradorligi ilmiy asosda baholandi. Nazariy hisoblashlar, modelashtirish va amaliy ma‘lumotlar tahlili shuni ko‘rsatdiki, ushbu texnologiyalarni alohida qo‘llashda samarasi cheklangan bo‘lib, ularning funksional va axborot integratsiyasi esa nasos komplekslarining energetik va ekspluatatsiyaviy samaradorligini sifat jihatdan oshiradi.

ChO‘ motor tezligini uzluksiz boshqarish va gidravlik parametrlarni «kub qonuni» asosida optimallashtirish orqali energiya sarfini kamaytiradi. NM algoritmlari tizimning noaniqliklar, nolneyliklar va tashqari ta’sirlar sharoitida barqaror ishlashini ta‘minlaydi, klassik PID-regulyatorlar imkoniyatlarini kengaytiradi. SCADA esa monitoring, masofaviy boshqaruv va qaror qabul qilishni qo‘llab-quvvatlovchi yagona axborot-idoralash muhitini yaratadi.

NM + ChO‘ + SCADA integratsiyasi quyidagi natijalarni beradi:

- energiya sarfini o‘rtacha 35–40% ga kamaytiradi;
- tizim FIKini ~70% dan 75-80% gacha oshiradi;
- ekspluatatsiya xarajatlarini 15–25% ga qisqartiradi;
- uskunalar xizmat muddatini uzaytiradi.

O‘zbekiston suv ta‘minoti va irrigatsiya shartlarida bunday tizim yiliga 3,5–4,2 mln kVt·soat elektr energiyasi tejash va 3–5 yilda investitsiyalarni qoplash imkonini beradi.

Olingan natijalar nasos stansiyalarini kompleks avtomatlashtirishning ilmiy asosini yaratadi va avtomatlashtirilgan elektr yuritma nazariyasini amaliyot bilan uzviy bog‘laydi. Aniqlangan afzalliklardan kelib chiqib, nasos stansiyalarini zamonaviylashtirishda ChO‘, NM va SCADA integratsiyasiga ustuvorlik berish, mavsumiy va kunlik yuklama o‘zgarishlarini hisobga olgan adaptiv algoritmlar ishlab chiqish, shuningdek, kiberxavfsizlik choralarini loyihalash bosqichida ta‘minlash tavsiya etiladi.

Kelgusida rivojlanish yo‘nalishlari sifatida nasos komplekslarining raqamli egizaklarini yaratish, sun‘iy intellekt asosida bashoratli boshqaruvni joriy etish, gibrid algoritmlar (ChO‘ + NM + AI) ishlab chiqish va IoT integratsiyasini amalga oshirish nazarda tutiladi. Bu choralar reaktiv boshqaruvdan proaktiv va o‘z-o‘zini moslashtiruvchi optimallashtirishga o‘tishni ta‘minlaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar

- [1]. Gonzalez J., Ramirez M., Ortega J. Energy Efficiency in Water Pumping Systems Using VFDs // Elsevier Energy Reports. – 2011. – Vol. 7. – P. 120–127.
- [2]. Li X., Chen Y. Adaptive Control of Variable-Speed Pumps for Water Distribution // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 59, No. 5. – P. 2042–2050.
- [3]. Mateescu, G., Cretu, V. Energy Saving Potential in District Heating Systems by Using Variable Speed Pumps // Sustainability. — 2015. — Vol. 7, No. 5. — P. 5705–5727. DOI: 10.3390/su7055705.



- [4]. ABB. Energy efficiency in pumping: Variable frequency drives cut energy use by as much as 60 %. — Zürich: ABB Group, 2012. — 12 p.
URL: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105713A2799>
- [5]. Kumar A., Singh R. Design of Fuzzy Logic Controller for Energy Optimization in Pumping Stations // IEEE Xplore Conference Proceedings. — 2016. — P. 1–6.
- [6]. Chen S., Wu J., Zhang Y. Comparative Study of PID and Fuzzy Controllers in Variable-Speed Pumping Systems // Springer Journal of Control and Intelligent Systems. — 2017. — Vol. 45, No. 3. — P. 210–218.
- [7]. Alavi H., Kargar M., Sadeghi B. Energy Efficient Water Supply using Intelligent Control Algorithms // Scopus Indexed Journal of Water Systems Engineering. — 2018. — Vol. 13, No. 4. — P. 302–310.
- [8]. Zhao L., Huang Z., Mei Q. Integration of SCADA and Fuzzy Controllers for Water Pumping Optimization // Elsevier Journal of Process Control. — 2020. — Vol. 92. — P. 85–94.
- [9]. Patel M., Rao D. SCADA-Fuzzy Based Control of Multi-Pump Water Supply Network // Elsevier Automation in Construction. — 2021. — Vol. 123. — P. 103485.
- [10]. Liu Y., Zhang W., Jin L. Fuzzy-PID Based SCADA Control for Urban Water Networks // IWA Journal of Water Supply: Research and Technology. — 2019. — Vol. 68, No. 7. — P. 612–621.
- [11]. Ahmed A., Hussein M., Younis M. Hybrid Fuzzy and Machine Learning Based Adaptive Pump Control System Integrated with SCADA // Applied Energy. — 2023. — Vol. 333. — P. 120312.
- [12]. Hernandez J., Salazar R. SCADA-Integrated Reinforcement Learning for Water Pump Efficiency // MDPI Water. — 2022. — Vol. 14, No. 9. — P. 1420.
- [13]. Yamamoto T., Tanaka K. Intelligent Fuzzy Supervisory Control with Predictive Adaptation for Urban Pumping Stations // IEEE Access. — 2024. — Vol. 12. — P. 54321–54330.
- [14]. Bekturov A., Usmanov D., Saparov A. AI-enhanced SCADA Systems in Central Asian Pumping Networks // Elsevier Automation and Systems Journal. — 2023. — Vol. 28, No. 1. — P. 67–75.
- [15]. Ramadhan M.G., Abdullah M. Implementation of fuzzy logic controller on pump system for energy saving // International Journal of Engineering Research and Technology. — 2021. — Vol. 10, No. 5. — P. 125–130.
- [16]. Shapovalov V.M., Gavriluk V.N. Energy-efficient control of pump stations using VFD and SCADA // Automation in Industry. — 2020. — Vol. 6, No. 3. — P. 55–62.
- [17]. Xu Y., Zhang H. Integration of fuzzy control with VFD for nonlinear pumping systems // Journal of Intelligent Systems. — 2019. — Vol. 28, No. 2. — P. 99–106.
- [18]. Hydraulic Institute; Europump; U.S. Department of Energy. *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems*. // Parsippany, NJ: Hydraulic Institute, 2001. — 68 p.
- [19]. National Instruments. *Industrial Communication Protocols Overview*. — Austin, TX: National Instruments, 2020. — 45 p.
- [20]. Karassik, I. J. Pump handbook [Text] // I. J. Karassik, W. C. Krutzsch, W. H. Fraser, J. P. Messina. — 4th ed. — New York: McGraw-Hill, 2008. — 1456 p.
- [21]. U.S. Department of Energy. Pumping system assessment tool (PSAT) — user's guide [Text]. — Washington, DC: U.S. DOE, 2003. — 72 p.
- [22]. OPC Foundation. OPC unified architecture specification [Text]. — Vol. 1–4. — OPC Foundation, 2017. — (Specification).
- [23]. Modbus Organization. Modbus application protocol specification V1.1b3 [Text]. — Modbus.org, 2006. — 56 p.
- [24]. IEEE. IEEE Std 519™–2014 — IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems [Text]. — IEEE, 2014. — 61 p.
- [25]. White, F. M. Fluid mechanics [Text] // F. M. White. — 8th ed. — New York: McGraw-Hill, 2016. — 912 p.