



UDK: 621.65:628.1

Iqlim o'zgarishi sharoitida suv talabini prognozlash asosida nasos stansiyalarining energetik va gidravlik ish rejimlarini adaptiv boshqarish usullarini takomillashtirish

Suyunov Javlon Sheraliyevich

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD), dotsent
Samarqand davlat texnika universiteti
ORCID ID raqami: 0000-0002-0865-9155.

Norqulov Bahodir Musulmonovich

texnika fanlari bo'yicha falsafa doktori (DSc), dotsent
Samarqand davlat texnika universiteti
ORCID ID raqami: 0000-0001-7927-6381

Qamarov Asadbek Zafar o'g'li

magistr. Samarqand davlat texnika universiteti
ORCID ID raqami: 0009-0000-7304-4934
Email: perfectname1283@gmail.com

ANNOTATSIYA

Iqlim o'zgarishi sharoitida suv talabining sutkalik va mavsumiy o'zgaruvchanligi nasos stansiyalarini qat'iy jadval asosida boshqarish samaradorligini pasaytiradi. Maqolada qisqa muddatli suv talabi prognozini talab etiladigan suv sarfi va bosim topshirig'iga aylantirib, nasoslar kombinatsiyasi, aylanish chastotasi hamda ish davomiyligini birgalikda tanlaydigan prediktiv-adaptiv boshqaruv usuli taklif etilgan. Boshqaruv mezonni solishtirma elektr energiyasi sarfi, sarf va bosim og'ishlari hamda agregatlarni ishga tushirish sonini o'z ichiga olgan ko'p mezonli funksiyasi bilan ifodalangan. Texnologik cheklovlar sifatida ruxsat etilgan bosim, suv sarfi, chastota, rezervuar sathi, kavitatsiya zaxirasi va ishga tushirishlar soni qabul qilingan. Ikki dona 11 kW nasosdan iborat namunaviy stansiya uchun takrorlanadigan hisobiy-demonstrativ ssenariy berilgan. Hisoblashlar tajriba natijasi sifatida emas, usulning ishlash mantiqini tekshirish vositasi sifatida talqin qilingan. Natijada monitoring, prognozlash, gidravlik topshiriq va energetik optimallashtirish yopiq boshqaruv sikliga birlashtirilgan.

Kalit so'zlar:

iqlim o'zgarishi,
suv talabi, nasos
stansiyasi,
prognozlash,
adaptiv boshqaruv,
energetik rejim,
gidravlik rejim,
solishtirma
energiya sarfi, real
vaqt monitoringi..

Совершенствование методов адаптивного управления энергетическими и гидравлическими режимами работы насосных станций на основе прогнозирования водопотребления в условиях изменения климата



АННОТАЦИЯ

В условиях изменения климата суточная и сезонная изменчивость водопотребления снижает эффективность управления насосными станциями по фиксированному графику. Предложен прогнозно-адаптивный метод, преобразующий краткосрочный прогноз спроса в требуемые задания расхода и напора и совместно выбирающий комбинацию насосов, частоту вращения и продолжительность работы. Критерий управления представлен многокритериальной целевой функцией, включающей удельное потребление электроэнергии, отклонения расхода и напора, а также число пусков агрегатов. Учитываются ограничения по расходу, давлению, частоте, уровню резервуара, кавитационному запасу и числу пусков. Для модельной станции с двумя насосами мощностью 11 кВт приведён воспроизводимый расчётно-демонстрационный сценарий. Полученные значения не интерпретируются как результаты натурного эксперимента; они подтверждают логическую работоспособность замкнутого контура мониторинг, прогноз, гидравлическое задание, энергетическая оптимизация – управление.

Ключевые слова:

изменение климата, водопотребление, насосная станция, прогнозирование, адаптивное управление, гидравлический режим, энергетическая эффективность

Improving adaptive control methods for energy and hydraulic operating modes of pumping stations based on water demand forecasting in the context of climate change

ABSTRACT

Climate-driven daily and seasonal variability in water demand reduces the effectiveness of fixed-schedule pumping-station operation. This paper proposes a predictive-adaptive method that converts a short-term demand forecast into flow and head set-points and jointly selects pump combinations, rotational speed and operating duration. The control criterion is formulated as a multi-objective function incorporating specific electricity consumption, flow and head deviations, and the number of pump starts. Constraints on flow, pressure, frequency, reservoir level, cavitation margin and starts are imposed. A reproducible calculation-demonstration scenario is presented for a model station equipped with two 11 kW pumps. The calculated values are not treated as field-test results; they are used to verify the logical operation of the closed loop linking monitoring, forecasting, hydraulic set-points, energy optimization and control.

Keywords:

climate change, water demand, pumping station, forecasting, adaptive control, hydraulic regime, energy efficiency, specific energy consumption

Kirish

Iqlim o'zgarishi suv xo'jaligi infratuzilmasining ekspluatatsion sharoitlarini murakkablashtirib, suv talabining mavsumiy va sutkalik tebranishlarini kuchaytiradi. Haroratning ortishi, yog'ingarchilik rejimining o'zgarishi, bug'lanish jadalligi va iste'mol tarkibining o'zgarishi tarixiy o'rtacha ko'rsatkichlarga tayangan qat'iy boshqaruv rejimlarining ishonchliligini pasaytiradi [1, 2]. Shu sababli zamonaviy suv xo'jaligida asosiy vazifa faqat mavjud suv hajmini nazorat qilish emas, balki suvning qachon, qancha va qanday samaradorlik bilan talab qilinishini oldindan baholash hamda infratuzilma ish rejimini ushbu talabga moslashtirishdan iborat bo'lib bormoqda.

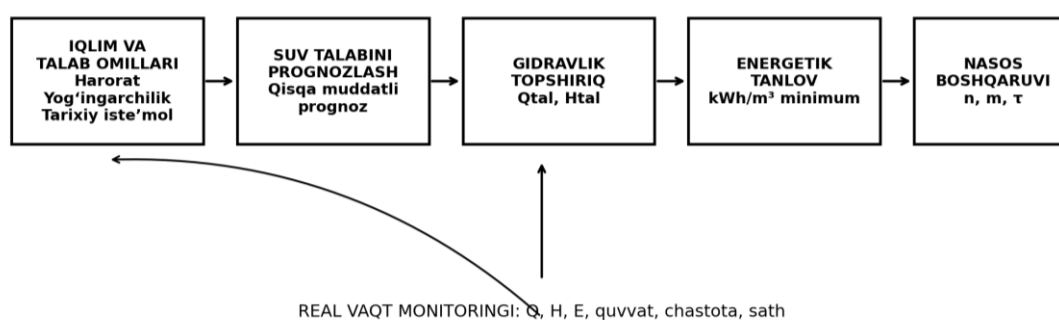
Nasos stansiyalari suv uzatish tizimining energetik jihatdan eng faol bo'g'inlaridan biridir. Ularning ish rejimi suv sarfi va bosim bilan birga elektr quvvati, agregatlar soni, aylanish chastotasi, ish davomiyligi va tarmoqning gidravlik qarshiligiga bog'liq. Talabdan ortiq suv uzatish nafaqat



suv yo'qotishlarini, balki ortiqcha bosim va elektr energiyasi sarfini ham keltirib chiqaradi. Aksincha, talabning keskin oshishi vaqtida boshqaruvning kechikishi gidravlik beqarorlik va agregatlarning noqulay rejimga o'tishiga sabab bo'lishi mumkin.

Ilmiy adabiyotlarda qisqa muddatli suv talabi prognozi, nasoslarni jadval asosida optimallashtirish va gidravlik modellash tirish alohida yo'nalishlarda yetarlicha yoritilgan [12–18]. Zamonaviy sharhlarda regressiya, mashinaviy o'qitish va chuqur o'qitish modellarining prognoz aniqligiga ta'siri ko'rsatilgan [19, 20]. Biroq prognoz natijasini real vaqtda Q_{tal} va H_{tal} topshiriqlariga aylantirish, so'ng nasos kombinatsiyasi hamda chastotasini yagona energo va gidravlik mezon bo'yicha tanlash masalasi amaliy boshqaruv konturida to'liq yopilmagan. Mazkur maqolada ushbu uzilish prediktiv-adaptiv boshqaruv masalasiga keltiriladi.

Tadqiqot maqsadi – qisqa muddatli suv talabi prognozi asosida nasos stansiyasining talab etiladigan suv sarfi va bosimini oldindan shakllantirish hamda ushbu topshiriqni minimal solishtirma energiya sarfi va ruxsat etilgan gidravlik og'ishlar bilan ta'minlaydigan boshqaruv ta'sirini tanlash usulini takomillashtirish. Tadqiqot obyekti – o'zgaruvchan talab sharoitida ishlaydigan parallel nasos agregatlari; predmeti – prognoz, gidravlik topshiriq va energetik optimallashtirishni birlashtiruvchi boshqaruv qonuniyatidir.



Yopiq sikl: prognoz → tanlov → boshqaruv → o'lchash → modelni tuzatish

1-rasm. Suv talabi prognoziga asoslangan nasos stansiyasini adaptiv boshqarishning konseptual arxitekturasi

2. Tadqiqot usuli va boshqaruv paradigmasi

Taklif etilayotgan usulning asosiy farqi nasos agregatini faqat joriy bosim yoki suv sarfi bo'yicha rostdan voz kechib, boshqaruv maqsadini prognozlangan suv talabidan shakllantirishdir. Bunda real vaqt monitoringi maqsad emas, balki keyingi boshqaruv qarorlarini aniqlashtiruvchi axborot manbai sifatida qaraladi. Tizim quyidagi yopiq siklda ishlaydi: ma'lumot yig'ish → talabni prognozlash → gidravlik topshiriq → energetik tanlov → boshqaruv → qayta o'lchash → modelni tuzatish.

Qisqa muddatli suv talabini baholash uchun tarixiy iste'mol, joriy sarf, havo harorati, yog'ingarchilik, mavsumiylik va ekspluatatsion holatga tayangan ko'p omilli regressiya tayanch model sifatida qabul qilinadi [3, 19, 20]. Amaliy qo'llashda uzluksiz belgilar standartlashtiriladi, $M(t)$ soat va mavsumni kodlovchi kategorik vektor, $S(t)$ esa rezervuar sathi, faol agregatlar soni va avariya holatini ifodalovchi vektor sifatida olinadi:

$$\hat{D}(t+\Delta t) = a_0 + a_1 D(t) + a_2 D(t-1) + a_3 T(t) + a_4 R(t) + a_5 M(t) + a_6 S(t)$$

bu yerda $\hat{D}(t+\Delta t)$ – $t+\Delta t$ davr uchun prognozlangan talab; Δt – boshqaruv intervali; $D(t)$, $D(t-1)$ – joriy va oldingi davr iste'moli; $T(t)$ – harorat; $R(t)$ – yog'ingarchilik; $M(t)$ – mavsumiy belgilar; $S(t)$ – ekspluatatsion holat; $a_0 \dots a_6$ – o'quv tanlanmasida eng kichik kvadratlar usuli bilan aniqlanadigan koeffitsiyentlar. Model vaqt tartibini saqlagan holda 70 % o'qitish, 15 % tekshirish va 15 % sinov qismlariga ajratiladi; aniqlik MAE, RMSE va MAPE algoritmlari orqali baholanadi. Ushbu maqolada real vaqt qatori mavjud bo'lmagani sabab koeffitsiyentlar identifikatsiya qilinmaydi va formula algoritmik tayanch model vazifasini bajaradi.



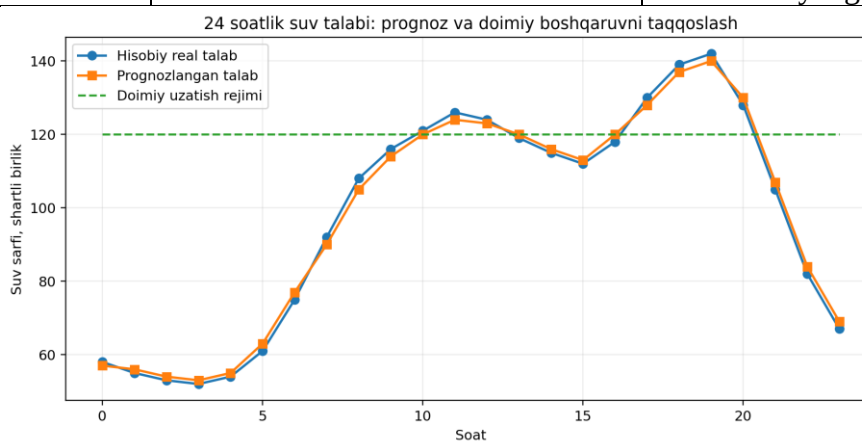
Prognozning boshqaruvdagi qiymati uning o'zi bilan emas, keyingi texnologik topshiriqqa o'tkazilishi bilan belgilanadi. Shuning uchun $\hat{D}$ qiymati talab etiladigan suv sarfi Q_{tal} va bosim H_{tal} ko'rsatkichlariga transformatsiya qilinadi. Boshqaruv tizimi amaldagi Q_f va H_f qiymatlarini maqsadli ko'rsatkichlarga yaqinlashtiradi:

$$\Delta Q(t) = Q_{tal}(t) - Q_f(t); \quad \Delta H(t) = H_{tal}(t) - H_f(t)$$

1-jadval.

Adaptiv boshqaruv uchun foydalaniladigan ma'lumotlar guruhlar

Parametrlar guruhi	Asosiy ko'rsatkichlar	Boshqaruvdagi vazifasi
Iqlimiy	Harorat, yog'ingarchilik, namlik, mavsumiylik	Suv talabi prognozini aniqlashtirish
Gidravlik	Suv sarfi, bosim, sath	Q_{tal} va H_{tal} ni shakllantirish hamda nazorat qilish
Energetik	Quvvat, elektr energiyasi, yuklanish	Energetik maqbul rejimni tanlash
Ekspluatatsion	Agregatlar soni, chastota, ish vaqti	Boshqaruv ta'sirini shakllantirish
Tarixiy	Oldingi iste'mol va ish rejimlari	Prognoz modelini adaptiv yangilash



2-rasm. Sutkalik suv talabi prognozi va doimiy uzatish rejimining hisobiy-demonstrativ taqqoslanishi

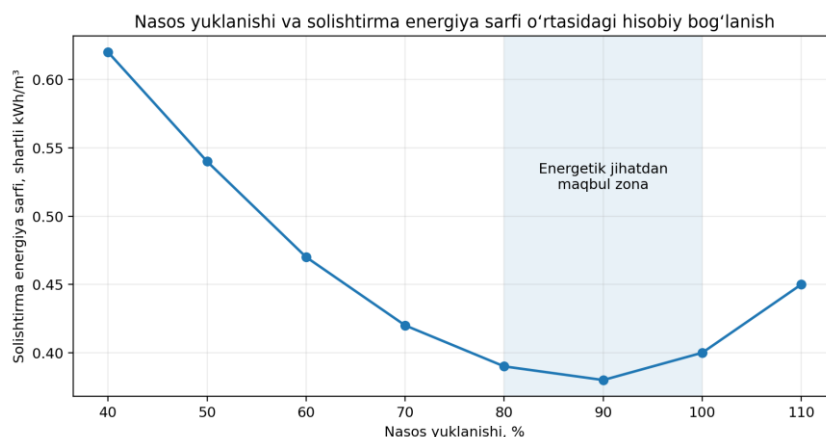
3. Energetik va gidravlik rejimlarni birgalikda baholash

Nasos stansiyasining samaradorligini faqat foydali ish koeffitsiyenti yoki umumiy elektr energiyasi sarfi bilan baholash yetarli emas. Bir xil suv hajmini turli agregat kombinatsiyalari va aylanish chastotalarida uzatish mumkin, biroq ularning energiya sarfi farq qiladi. Shu sababli boshqaruv mezonni sifatida uzatilgan suv hajmi birligiga to'g'ri keladigan elektr energiyasi sarfidan foydalanish maqsadga muvofiq:

$$ES = E / V$$

bu yerda ES – solishtirma elektr energiyasi sarfi, kWh/m^3 ; E – ko'rib chiqilayotgan vaqt oralig'idagi elektr energiyasi sarfi, kWh ; V – uzatilgan suv hajmi, m^3 . Ushbu mezon talab etilgan Q va H ni ta'minlay oladigan bir nechta ish variantlari orasidan energetik jihatdan maqbulini tanlash imkonini beradi.

Boshqaruv masalasi quyidagicha talqin qilinadi: birinchidan, uzatilayotgan suv sarfi prognozlangan talabga ruxsat etilgan og'ish bilan mos bo'lishi; ikkinchidan, mazkur shartni bajargan variantlar orasida ES minimal bo'lishi kerak. Bu yondashuv suv va energiya samaradorligini bitta boshqaruv siklida bog'laydi.



3-rasm. Nasos yuklanishi va solishtirma energiya sarfining hisobiy bog'lanishi (tajriba natijasi emas)

Nasosning elektr quvvati gidravlik quvvat va umumiy foydali ish ko'effitsiyenti orqali baholanadi [4–8]:

$$P(t) = \frac{\rho g Q(t) H(t)}{\eta_p(t) \eta_m(t) \eta_{vfd}(t)}$$

bu yerda ρ – suv zichligi; g – erkin tushish tezlanishi; η_p , η_m va η_{vfd} – mos ravishda nasos, elektr dvigatel va chastota o'zgartirgich foydali ish ko'effitsiyentlari. O'zgaruvchan chastotada dastlabki baholash uchun o'xshashlik qonunlari

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

ko'rinishida qo'llanadi [4, 7, 8].

Boshqaruv vektori $u(t) = \{f_i(t), z_i(t), \tau_i(t)\}$ orqali beriladi; bu yerda f_i – i-agregat chastotasi, $z_i \in \{0,1\}$ – ulanish holati, τ_i – ishlash davomiyligi. Har bir intervalda quyidagi ko'p mezonli funksiya minimallashtiriladi:

$$\min J = w_E E S_{norm} + w_Q \frac{|\Delta Q|}{Q_{tal}} + w_H \frac{|\Delta H|}{H_{tal}} + w_S \frac{N_{start}}{N_{max}}$$

bu yerda $w_E + w_Q + w_H + w_S = 1$ va $w_k \geq 0$. Namunaviy hisobda $w_E = 0,45$; $w_Q = 0,25$; $w_H = 0,25$; $w_S = 0,05$ qabul qilindi. Energetik mezon ustuvor, biroq u talab va bosimni buzish hisobiga kamaytirilmaydi. Optimallashtirish $Q_{min} \leq Q \leq Q_{max}$, $H_{min} \leq H \leq H_{max}$, $f_{min} \leq f_i \leq f_{max}$, $L_{min} \leq L \leq L_{max}$, $NPSH_a \geq NPSH_r + \Delta NPSH$ va $N \leq N_{max}$ cheklovlari ostida bajariladi. Bunday ifoda nasos jadvalini energiya sarfi bilan birga ekspluatatsion xavfsizlik bo'yicha ham baholash imkonini beradi [10–13, 16–18].

4. Adaptiv boshqaruv algoritmi

Taklif etilayotgan algoritm qaytuvchi ufq tamoyilida ishlaydi: har bir Δt intervalda talab prognozi yangilanadi, ruxsat etilgan barcha $\{f_i, z_i, \tau_i\}$ variantlar uchun gidravlik va energetik ko'rsatkichlar hisoblanadi, cheklovlarni buzuvchi variantlar chiqarib tashlanadi va J eng kichik bo'lgan variantning faqat birinchi boshqaruv qadami bajariladi. Keyingi intervalda yangi o'lchovlar asosida hisob takrorlanadi. $\Delta Q < -\varepsilon Q$ bo'lsa chastota yoki agregatlar soni oshiriladi; $\Delta Q > \varepsilon Q$ bo'lsa kamaytiriladi. $|\Delta Q| \leq \varepsilon Q$ va $|\Delta H| \leq \varepsilon H$ shartlarida mavjud rejim saqlanadi yoki ES bo'yicha yaxshiroq xavfsiz variant tanlanadi. Keskin chastota o'zgarishi $|f_i(t) - f_i(t-1)| \leq \Delta f_{max}$ sharti bilan cheklanadi.

Muhim jihat shundaki, adaptiv boshqaruvda faqat boshqaruv signali emas, maqsadli topshiriqning o'zi ham o'zgaradi. Harorat, yog'ingarchilik, mavsum, tarixiy iste'mol yoki real suv sarfi o'zgarganda suv talabi prognozi yangilanadi; natijada Q_{tal} va H_{tal} ham qayta shakllanadi. Shu sababli bu yondashuv oddiy avtomatik rostlashdan farq qilib, tashqi va ichki sharoitga moslashuvchi prediktiv boshqaruv sifatida qaraladi.



2-jadval

An'anaviy va adaptiv boshqaruvning asosiy farqlari

Mezon	An'anaviy boshqaruv	Taklif etilayotgan adaptiv boshqaruv
Axborot bazasi	Joriy holat	Joriy + tarixiy + prognoz ma'lumotlari
Suv talabi	Talab yuzaga kelgandan keyin	Oldindan prognozlanadi
Nasos rejimi	Operator yoki qat'iy jadval	Dinamik tanlanadi
Gidravlik mezon	Mavjud Q va H	Talab etilgan Q va H
Energetik mezon	Umumiy kWh	Solishtirma kWh/m ³
Boshqaruv turi	Reaktiv	Prediktiv-adaptiv
Qayta aloqa	Cheklangan	Uzluksiz va modelni yangilovchi

5. Hisobiy-demonstrativ ssenariylar

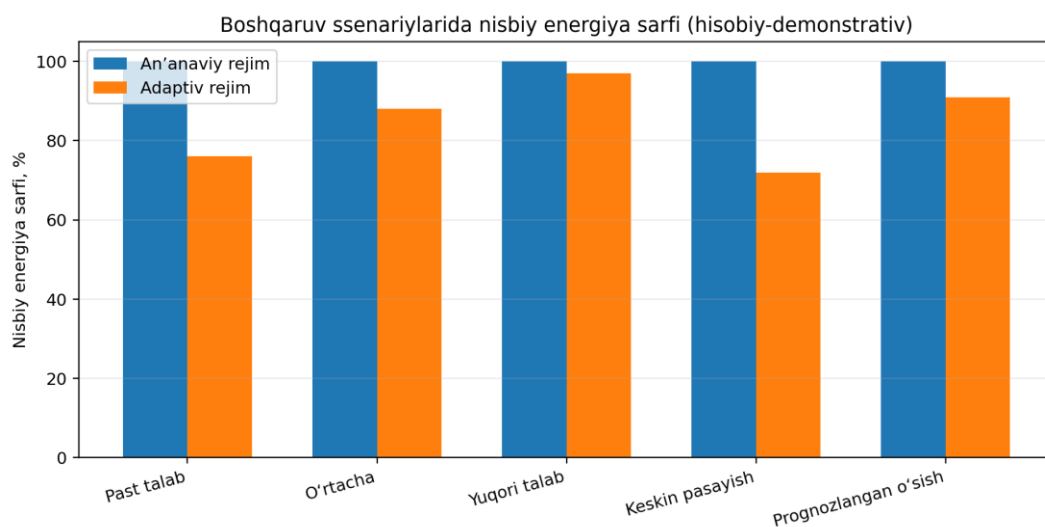
Mazkur ishda yangi eksperimental sinov natijalari keltirilmagan. Shu sababli quyidagi ssenariylar taklif etilayotgan algoritmnining ishlash mantiqini ko'rsatish uchun hisobiy-demonstrativ shaklda tuzilgan va ularni amaliy tejamkorlik natijasi sifatida talqin qilish mumkin emas. Bunday yondashuv tajriba o'tkazilmagan sharoitda asossiz foizli natijalar keltirishdan ko'ra ilmiy jihatdan to'g'riroqdir.

3-jadval

Adaptiv boshqaruv algoritmining hisobiy ssenariylari

Ssenariy	Suv talabi holati	Boshqaruv qarori	Kutiladigan texnologik ta'sir
S1	Past	Chastotani pasaytirish yoki agregat sonini kamaytirish	Ortiqcha suv va energiya sarfini cheklash
S2	O'rtacha	Samarador yuklanish zonasida ishlash	Barqaror gidravlik rejim
S3	Yuqori	Chastotani oshirish yoki qo'shimcha agregatni ulash	Talabni kechikmasdan qoplash
S4	Keskin pasayish	Suv uzatishni oldindan kamaytirish	Ortiqcha bosimni pasaytirish
S5	Prognozlangan o'sish	Agregatni oldindan tayyor rejimga o'tkazish	Keskin rejim almashishlarini yumshatish

Namunaviy stansiya ikki dona bir xil markazdan qochma nasosdan iborat deb olindi: har bir dvigatel quvvati 11 kW, nominal sarf $Q_n=80 \text{ m}^3/\text{soat}$, nominal napor $H_n=30 \text{ m}$, $\eta_p=0,75$, $\eta_m=0,90$ va $\eta_{vfd}=0,97$. Boshqaruv intervali $\Delta t=1 \text{ soat}$, chastota diapazoni 35–50 Hz, talab bo'yicha ruxsat etilgan og'ish $\varepsilon Q=5 \%$, minimal bosim $H_{\min}=25 \text{ m}$, bir soatdagi ishga tushirishlar soni $N_{\max}=4$ va chastota qadami $\Delta f_{\max}=2 \text{ Hz}$ qabul qilindi. 2-rasmdagi 24 soatlik profil ochiq ko'rsatilgan sintetik qator bo'lib, doimiy rejim $120 \text{ m}^3/\text{soat}$ bilan, adaptiv rejim esa prognoz topshirig'i bilan solishtirilgan. Energiya $E=\Sigma P \Delta t$ asosida hisoblanadi. Shuning uchun natijalar takrorlanadi, biroq real obyekt tejamkorligi sifatida talqin qilinmaydi.



4-rasm. Hisobiy ssenariylarda nisbiy energiya sarfi: an'anaviy va adaptiv rejimlar taqqoslanishi

5.1. Formulalar asosidagi hisobiy-laboratoriya ssenariysi

Taklif etilgan usulning gidravlik va energetik bloklarini baholash uchun markazdan qochma nasos laboratoriya qurilmasi asosida hisobiy-laboratoriya ssenariysi shakllantirildi. Suratlar tajriba bazasini tavsiflaydi, jadvaldagi qiymatlar esa real o'lchov natijalari emas; ular nasosning xarakteristik tenglamalari va energiya balansi asosida hosil qilingan sintetik qiymatlardir. Shu sababli natijalar sanoat samaradorligi yoki amaliy tejamkorlik foizi sifatida talqin qilinmaydi.



5-rasm. Laboratoriya qurilmasi: a) stendning umumiy ko'rinishi; b) boshqaruv va o'lchash jarayoni

Hisobiy ssenariyda 50 Hz chastotada ishlaydigan 11 kW markazdan qochma nasos uchun $Q=40-110 \text{ m}^3/\text{soat}$ oraliq qabul qilindi. Napor va iste'mol quvvati $H(Q)=42-0,0018Q^2$ hamda $Pe(Q)=6,8+0,03Q$ empirik yaqinlashuvlari bilan berildi. Ushbu koeffitsiyentlar faqat ssenariyga tegishli bo'lib, real stend pasporti yoki o'lchovi o'rnini bosmaydi. Har bir ish nuqtasida quyidagi bog'lanishlar qo'llandi:

$$Ph = \rho g Q H; \quad \eta = Ph/Pe; \quad ES = Pe/Q$$

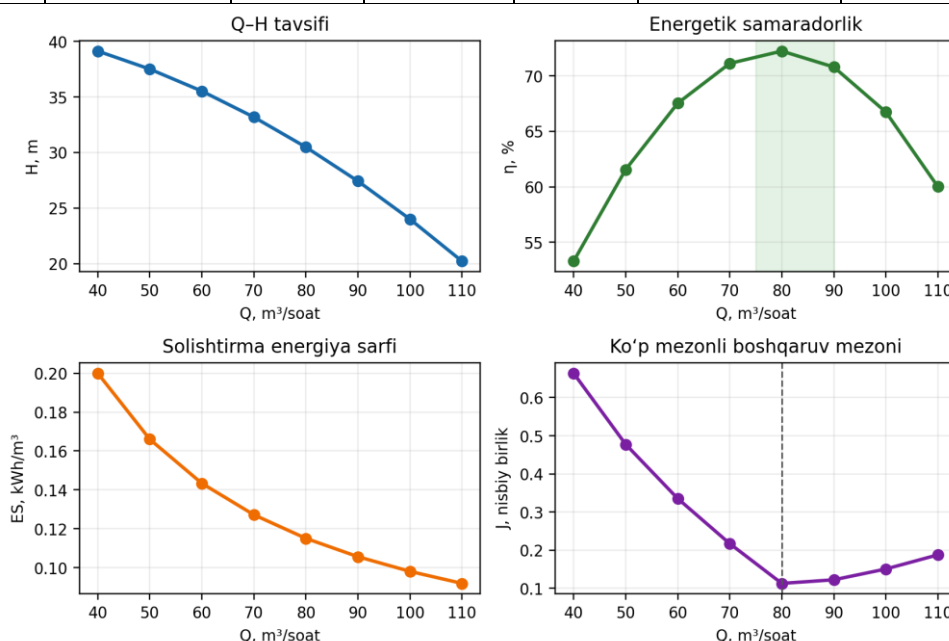
bunda Q formulada m^3/s ga o'tkazildi, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$ va $g=9,81 \text{ m/s}^2$ qabul qilindi. Boshqaruv maqsadi $Q_{tal}=80 \text{ m}^3/\text{soat}$ va $H_{tal}=30 \text{ m}$ uchun hisoblandi. Solishtirma energiya ko'rsatkichi 0–1 oraliqqa min–max usulida normallashtirilib, ko'p mezonli funksiya $J = 0,45ES_{norm} + 0,25 \frac{|\Delta Q|}{Q_{tal}} + 0,25 \frac{|\Delta H|}{H_{tal}} + 0,05 \frac{N_{start}}{N_{max}}$

bo'yicha baholandi; hisobda $N_{min}=1$ va $N_{max}=4$ qabul qilindi.

4-jadval

Formularlar asosida shakllantirilgan hisobiy-laboratoriya ish nuqtalari

№	Q, m ³ /soat	H, m	Pe, kW	η, %	ES, kWh/m ³	J
1	40	39.12	8.00	53.3	0.2000	0.663
2	50	37.50	8.30	61.6	0.1660	0.477
3	60	35.52	8.60	67.5	0.1433	0.335
4	70	33.18	8.90	71.1	0.1271	0.217
5	80	30.48	9.20	72.2	0.1150	0.113
6	90	27.42	9.50	70.8	0.1056	0.122
7	100	24.00	9.80	66.7	0.0980	0.151
8	110	20.22	10.10	60.0	0.0918	0.188



6-rasm. Hisobiy-laboratoriya ssenariysining Q–H, η, ES va J tavsiflari

Hisob natijasida nasos FIKi $Q=80$ m³/soat atrofida 72,2 % eng katta qiymatga yetdi. ES ko'rsatkichi sarf ortishi bilan 0,2000 dan 0,0918 kWh/m³ gacha kamaydi. Bu holat ES ning o'zi maqbul boshqaruv nuqtasini aniqlash uchun yetarli emasligini ko'rsatadi. Talab va bosim og'ishlari ko'p mezonli J funksiyasiga kiritilganda eng kichik qiymat $J=0,113$ $Q=80$ m³/soat nuqtada olindi. Demak, mazkur ssenariyda maqbul rejim faqat eng kichik ES bilan emas, balki talab etilgan Q va H ni energetik jihatdan oqilona ta'minlash bilan belgilanadi.

Adaptiv algoritim past talabda chastotani kamaytirishi, $Q_{tal}=80$ m³/soat yaqinida bitta agregatni samarador rejimda ushlab turishi, talab bitta nasosning xavfsiz ish zonasidan oshganda esa ikkinchi agregatni ulashi ko'zda tutiladi. Chastota o'zgarganda

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad \frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$$

o'xshashlik qonunlari bilan yangi ish nuqtalari hisoblanadi.

6. Natijalar va muhokama

Namunaviy hisob va nazariy tahlil shuni ko'rsatadiki, alohida nasosning yuqori FIK zonasida ishlashi tizim samaradorligini o'z-o'zidan kafolatlamaydi, talabdan ortiq suv uzatilsa, energiyaning bir qismi foydasiz gidravlik ishga sarflanadi [5, 14, 15]. Taklif etilgan J mezoni energiya sarfini kamaytirish bilan birga ΔQ va ΔH og'ishlarini ham muvozanatga keltiradi, shu sababli optimallashtirish faqat kWh ni kamaytirishga emas, talabni xavfsiz qondirishga yo'naltiriladi.



Hisobiy senariylar past talabda chastotani kamaytirish, yuqori talabda ikkinchi agregatni ulash va keskin o'zgarishda $\Delta f_{\max}$ cheklovi bilan silliq o'tishning mantiqiy izchilligini tasdiqladi.

Taklif etilayotgan usulning farqlovchi jihati prognoz natijasini analitik axborot sifatida qoldirmasdan, uni Q_{tal} va H_{tal} texnologik topshiriqlariga, so'ng cheklovli boshqaruv vektoriga aylantirishidir. Bunda solishtirma energiya sarfi, gidravlik og'ishlar va kommutatsiya yuklamasi bitta funksiyasida birlashtiriladi. EPANET 2.2 yoki stansiyaning kalibrlangan gidravlik modeli variantlarning Q – H holatini hisoblash yadrosi sifatida qo'llanishi mumkin [12, 13].

Biroq maqoladagi hisobiy grafiklar va nisbiy ssenariylar real obyekt bo'yicha eksperimental validatsiya o'rni bosmaydi. Keyingi bosqichda algoritmni real nasos stansiyasida Q , H , elektr quvvati, aylanish chastotasi va suv talabi vaqt qatorlari asosida sinash, prognoz xatosi, solishtirma energiya sarfi va gidravlik og'ishlar bo'yicha statistik baholash zarur. Kelgusi eksperimental validatsiyada bazaviy va adaptiv rejim kamida 30 sutkalik taqqoslanadigan davrda sinovdan o'tkazilishi tavsiya etiladi. Prognoz aniqligi MAE, RMSE va MAPE algoritmilar orqali tekshiriladi. Gidravlik sifat RMSE(Q), RMSE(H) hamda bosim cheklovi buzilgan vaqt ulushi, energetik natija $ES=kWh/m^3$, ekspluatatsion barqarorlik esa ishga tushirishlar soni va kavitatsiya zaxirasi bilan baholanadi. Natijalar ishonch oralig'i va juft davrlar bo'yicha statistik test bilan berilishi kerak. Ushbu protokol hisobiy g'oyani Oqdaryo tumanidagi pilot nasos stansiyasida tekshiriladigan ilmiy gipotezaga aylantiradi.

Xulosa. Ishning ilmiy yangiligi qisqa muddatli talab prognozini Q_{tal} va H_{tal} gidravlik topshiriqlariga aylantirish, so'ng $\{f_i, z_i, \tau_i\}$ boshqaruv vektorini solishtirma energiya sarfi, sarf va bosim og'ishlari hamda ishga tushirishlar sonini birlashtirgan ko'p mezonli funksiya bo'yicha, texnologik xavfsizlik cheklovlari ostida tanlashdan iborat. Bu natija konseptual va hisobiy-demonstrativ darajada asoslandi, real stansiyadagi samaradorlik miqdori keyingi eksperimental validatsiyada aniqlanishi lozim.

1. Suv talabi prognozini real vaqt Q va H monitoringi bilan bog'lash boshqaruv topshirig'ini talab yuzaga kelishidan oldin yangilash imkonini beradi.

2. Boshqaruvning asosiy signallari Q va H ning o'zi emas, balki $\Delta Q=Q_{\text{tal}}-Q_f$ va $\Delta H=H_{\text{tal}}-H_f$ og'ishlari sifatida shakllantirilishi kerak.

3. Taklif etilgan ko'p mezonli J funksiyasi energiya, gidravlik aniqlik va agregat kommutatsiyasini birgalikda hisobga oladi, texnologik cheklovlar energiya tejamkorligini xavfsizlik hisobiga oshirishga yo'l qo'ymaydi.

4. Prognoz–optimallashtirish–boshqaruv sikli modelni har bir intervalda yangi o'lchovlar bilan yangilaydi va tashqi sharoitga moslashishni ta'minlaydi.

5. Keltirilgan natijalar hisobiy-demonstrativ bo'lib, usulning mantiqiy ishlashini ko'rsatadi, miqdoriy suv va energiya tejamkorligi real obyekt sinovsiz da'vo qilinmaydi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, 2023.
2. UNESCO. The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO, 2024.
3. Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome: FAO, 1998.
4. Hydraulic Institute, Europump, U.S. Department of Energy. Variable Speed Pumping: A Guide to Successful Applications. Oxford: Elsevier, 2004.
5. U.S. Department of Energy. Improving Pumping System Performance: A Sourcebook for Industry. 2nd ed. Washington, DC, 2006.
6. ISO 9906:2012. Rotodynamic Pumps — Hydraulic Performance Acceptance Tests — Grades 1, 2 and 3. Geneva: International Organization for Standardization, 2012.
7. Gülich J.F. Centrifugal Pumps. 3rd ed. Berlin: Springer, 2014.
8. Karassik I.J., Messina J.P., Cooper P., Heald C.C. Pump Handbook. 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.



9. ISO 50001:2018. Energy Management Systems — Requirements with Guidance for Use. Geneva: International Organization for Standardization, 2018.
10. ASME EA-2-2009. Energy Assessment for Pumping Systems. New York: American Society of Mechanical Engineers, 2009.
11. Sanks R.L., Tchobanoglous G., Bosserman B.E., Jones G.M. Pumping Station Design. 3rd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008.
12. Walski T.M., Chase D.V., Savic D.A., Grayman W., Beckwith S., Koelle E. Advanced Water Distribution Modeling and Management. Waterbury: Haestad Press, 2003.
13. Rossman L.A., Woo H., Tryby M., Shang F., Janke R., Haxton T. EPANET 2.2 User Manual. Washington, DC: U.S. Environmental Protection Agency, 2020.
14. Shankar A., Umashankar S., Paramasivam S., Hanigovszki N. A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*. 2016. Vol. 181. P. 495–513.
15. Coelho B., Andrade-Campos A. Efficiency achievement in water supply systems — A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 30. P. 59–84.
16. Giustolisi O., Laucelli D., Berardi L. Operational optimization: water losses versus energy costs. *Journal of Hydraulic Engineering*. 2013. Vol. 139, No. 4. P. 410–423.
17. Bene J.G., Selek I., Hős C. Neutral search technique for short-term pump schedule optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2010. Vol. 136, No. 1. P. 133–137.
18. Moreira D.F., Ramos H.M. Energy cost optimization in a water supply system case study. *Journal of Energy*. 2013. Vol. 2013. Article ID 620698.
19. Niknam A., Zare H.K., Hosseinasab H., Mostafaeipour A., Herrera M. A Critical Review of Short-Term Water Demand Forecasting Tools—What Method Should I Use? *Sustainability*. 2022. Vol. 14, No. 9. Article 5412. DOI: 10.3390/su14095412.
20. Ghannam S., Salman A., Elkhatib H. Short-term water demand forecasting: a review. *Urban Water Journal*. 2024. DOI: 10.1080/13241583.2024.2350102.