DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

CHASTOTA BOSHQARILADIGAN NASOS TIZIMIDA ENERGIYA YO‘QOTISHLARINI ZANJIR BO‘YLAB TAHLIL QILISH VA OPTIMALLASHTIRISH

Qurvonboyev Botirjon Isroiljon o‘g‘li, *tayanch doktorant,*
E-mail: qurvonboyevbotirjon@gmail.com
Namangan davlat texnika universiteti

Annotatsiya. *Mazkur maqolada suv ta'minoti va sug‘orish tizimlarida chastota boshqariladigan nasos agregatlarining energiya yo‘qotishlari tahlil qilinadi. 100 kWt quvvatli model tizim misolida to‘liq energiya uzatish zanjiri (elektr tarmoq → chastota o‘zgartirgich → asinxron dvigatel → nasos agregati → gidravlik tarmoq) bo‘yicha yo‘qotishlar mexanizmlari, ularning fizik asoslari, miqdoriy bahosi va optimallashtirish strategiyalari batafsil yoritiladi. MATLAB/Simulink muhitida qurilgan dinamik matematik model yordamida nominal rejimda umumiy tizim samaradorligi 31.7% ekanligini, 75% yuklamada esa chastota boshqaruvi orqali 58.6% gacha energiya tejash potentsiali mavjudligini aniqlandi. Kompleks optimallashtirish strategiyasi (gidravlik tarmoq rekonstruksiyasida IE4 sinf dvigatel qo‘llash orqali yuqori samarali nasos) yordamida umumiy samaradorlikni 44.8% gacha oshirish mumkinligi ko‘rsatildi. Tadqiqot O‘zbekiston Respublikasining 2030-yilgacha bo‘lgan suv xo‘jaligi modernizatsiya dasturlari kontekstida amaliy tavsiyalar beradi va yillik 531,612 kWt·soat energiya tejash, 265.8 tonna CO_2 emissiyasini kamaytirishni ko‘rsatadi.*

Аннотация. *В данной статье анализируются потери энергии частотно-регулируемых насосных агрегатов в системах водоснабжения и орошения. На примере модельной системы мощностью 100 кВт подробно описаны механизмы потерь по всей цепи передачи энергии (электрическая сеть → преобразователь частоты → асинхронный двигатель → насосный агрегат → гидравлическая сеть), их физические основы, количественная оценка и стратегии оптимизации. С помощью динамической математической модели, построенной в среде MATLAB/Simulink, установлено, что общий КПД системы в номинальном режиме составляет 31,7%, а при нагрузке 75% потенциал экономии энергии за счёт частотного управления достигает 58,6%. Показано, что применение комплексной стратегии оптимизации (использование высокоэффективного насоса с двигателем класса IE4 при реконструкции гидравлической сети) позволяет повысить общий КПД до 44,8%. Исследование даёт практические рекомендации в контексте программ модернизации водного хозяйства Республики Узбекистан до 2030 года и показывает ежегодную экономию энергии в размере 531 612 кВт·ч, снижение выбросов CO_2 на 265,8 тонны.*

Abstract*. This article analyzes the energy losses of frequency-controlled pump units in water supply and irrigation systems. Using the example of a model system with a capacity of 100 kW, the mechanisms of losses along the entire energy transmission chain (electrical network → frequency converter → asynchronous motor → pump unit → hydraulic network), their physical foundations, quantitative assessment and optimization strategies are described in detail. Using a dynamic mathematical model built in the MATLAB/Simulink environment, it was determined that the overall system efficiency in the nominal mode is 31.7%, and at 75% load there is a potential for energy savings of up to 58.6% through frequency control. It was shown that using a complex optimization strategy (using a high-efficiency pump with an IE4 class motor in the reconstruction of the hydraulic network) the overall efficiency can be increased to 44.8%. The study provides practical recommendations in the context of the Republic of Uzbekistan's water management modernization programs until 2030 and shows annual energy savings of 531,612 kWh, reduction of 265.8 tons of CO_2 emissions.*

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

Kalit so‘zlar: *nasos agregati, chastota o‘zgartirgich (ChaO‘), energiya yo‘qotishlari, gidravlik tarmoq, MATLAB/Simulink modellashtirish, energiya samaradorligi.*

Ключевые слова: *насосный агрегат, преобразователь частоты (ПЧ), потери энергии, гидравлическая сеть, моделирование в MATLAB/Simulink, энергоэффективность.*

Keywords: *pumping unit, frequency converter (VFD), energy losses, hydraulic network, MATLAB/Simulink modeling, energy efficiency.*

Kirish. Muammoning global va milliy ahamiyati Zamonaviy sanoat va kommunal xo‘jalik infratuzilmasida nasos agregatlarining energiya samaradorligi global miqyosda eng muhim texnik-iqtisodiy va ekologik muammolardan biridir. Dunyo miqyosida ishlab chiqariladigan elektr energiyasining taxminan 20% i turli maqsadlardagi nasos tizimlariga sarflanadi, bu yillik taxminan 2,200 milliard kWt·soat ni tashkil etadi [1]. Sanoat sektorida bu ko‘rsatkich yanada yuqori bo‘lib, sanoatda iste'mol qilinadigan elektr energiyasining 25-50% i nasos agregatlariga to‘g‘ri keladi [2]. Bu raqamlar nasos tizimlarining energiya tejash potentsialining jiddiyligini va modernizatsiya zarurligini ko‘rsatadi. O‘zbekiston Respublikasida vaziyat yanada keskin va dolzarbdir. 2025-yilda e'lon qilingan "Uzbekistan to Modernize Its Irrigation Infrastructure" hisobotiga ko‘ra, mamlakatdagi 1700 dan ortiq nasos stansiyasi yiliga taxminan 7.2 milliard kWt·soat elektr energiyasini iste'mol qiladi, bu milliy elektr energiyasi iste'molining 16% ini tashkil etadi [3]. Sug‘orish maqsadlari uchun ishlatiladigan nasos stansiyalarining elektr energiyasi sarfi yillik operatsion byudjetning 65-70% ini egallaydi va yiliga taxminan 3 million tonna CO_2 emissiyasiga olib keladi. bu ko‘rsatkichlar O‘zbekistonni dunyodagi eng energiya sarf qilinadigan suv xo‘jaligi tizimlariga ega mamlakatlardan biriga aylantiradi [4]. Shu bilan birga, mamlakatning yillik suv iste'moli 1980-yillardagi 64 milliard kub metrdan 2021-yilda 43.2 milliard kub metrga tushgan [3], ammo energiya samaradorligi bo‘yicha jiddiy muammolar saqlanib qolmoqda.

Nasos tizimlaridagi energiya yo‘qotishlarining asosiy sabablari quyidagi omillar bilan bog‘liq: Texnik omillar:

1. Eskirgan uskunalar: 1970-1990-yillarda qurilgan nasos stansiyalari hozirgi texnik talablarga javob bermaydi. Bu uskunalar IE1 yoki undan ham past samaradorlik sinfiga ega bo‘lib, zamonaviy IE3-IE4 standartlariga nisbatan 4-7% ko‘proq energiya yo‘qotadi.
2. Zamonaviy boshqaruv tizimlarining yo‘qligi: Chastota o‘zgartirgichlar (ChaO‘) ning joriy etilishi O‘zbekistonda past darajada. Ko‘pchilik nasos agregatlari to‘g‘ridan-to‘g‘ri ulanish (Direct-On-Line - DOL) rejimida ishlaydi, bu o‘zgaruvchan yuklamalarda sezilarli energiya isrofiga olib keladi.
3. Gidravlik tarmoqlardagi yuqori yo‘qotishlar: Quvur liniyalarining eskirgani, korroziya va cho‘kindi jamlanishi natijasida bosim yo‘qotishlari nominal qiymatdan 2-3 barobar oshgan.
4. Nasos agregatlarining noto‘g‘ri tanlanishi: Ko‘p hollarda nasos quvvati zarurat bo‘lganidan 30-50% yuqori tanlanadi, bu esa nominal samaradorlik nuqtasidan uzoqda ishlashga olib keladi.

Ekspluatatsion omillar:

1. Optimal bo‘lmagan ish rejimlari: Nasoslar ko‘pincha nominal quvvatdan past (30-60%) yoki yuqori (110-120%) yuklamalarda ishlaydi, bu samaradorlik keskin pasayishiga olib keladi. Nominal nuqtadan 20% og‘ish nasos samaradorligini 10-15% ga pasaytiradi [5].
2. Profilaktik texnik xizmatning yetarli emasligi: Podshipniklar vaqtida almashtirilmasligi, muvozanatlashtirish amalga oshirilmasligi samaradorlikni kamaytiradi
3. Real vaqt monitoring tizimlarining yo‘qligi: Energiya sarfi, bosim va tebranishlarni doimiy kuzatish imkoniyati yo‘q, bu esa muammolarni erta aniqlashni qiyinlashtiradi.

Xalqaro energiya agentligi (IEA) va ISO 14414:2019 standartiga muvofiq o‘tkazilgan energiya auditlari ko‘rsatadiki, zamonaviy texnologiyalarni joriy etish orqali nasos tizimlarida 30-50% gacha energiya tejash potentsiali mavjud [6]. Bu O‘zbekiston uchun yiliga 2.1-3.6 milliard kWt·soat elektr energiyasini tejashni anglatadi.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

Tadqiqot obyekti: 100 kWt quvvatli markazdan qochma nasos agregati va uning chastota boshqariladigan elektr yuritmasi. Tadqiqot predmeti: Nasos tizimida energiya yo‘qotishlari, ularning fizik mexanizmlari, matematik modellari va kamaytirish usullari.

Tizimning umumiy tuzilmasi va energiya balansi. Energiya uzatish zanjirining strukturasi va samaradorlik konsepsiyasi chastota boshqariladigan nasos tizimi quyidagi ketma-ket ulangan va o‘zaro ta'sirlashuvchi elementlardan iborat kompleks energetik tizimdir: Elektr tarmoq → Chastota o‘zgartirgich → Asinxron dvigatel → Nasos agregati → Gidravlik tarmoq. Har bir element ma'lum darajadagi samaradorlikka ega bo‘lib, energiya bir elementdan ikkinchisiga uzatilganda yo‘qotishlar yuzaga keladi. Umumiy tizim samaradorligi barcha elementlar samaradorliklarining ko‘paytmasi sifatida aniqlanadi:

$$\eta_{umumiy} = \eta_{tarmoq} * \eta_{ChaO‘} * \eta_{dvigatel} * \eta_{nasos} * \eta_{gid.tar} \quad (1)$$

bu yerda: η_{umumiy} – elektr tarmoq samaradorligi (odatda 0.95-0.98); $\eta_{ChaO‘}$ – chastota o‘zgartirgich samaradorligi (0.95-0.985); $\eta_{dvigatel}$ – asinxron dvigatel samaradorligi (0.92-0.97, IE sinfiga bog‘liq); η_{nasos} – nasos agregati samaradorligi (0.70-0.90); $\eta_{gid.tar}$ – gidravlik tarmoq samaradorligi (0.30-0.70)

Bu munosabat energiya yo‘qotishlarining kaskad (ketma-ket) xarakterini ko‘rsatadi: har bir bosqichdagi yo‘qotish keyingi bosqichlarning samaradorligiga ta'sir qiladi va umumiy yo‘qotish xususiyatga ega. Foydali gidravlik quvvat quyidagicha aniqlanadi:

$$P_{foydali} = P_{kirish} * \eta_{umumiy} \quad (2)$$

Energiya yo‘qotishlarini nasos tizimida quyidagicha tasniflash mumkin: Yo‘qotishlar o‘rni bo‘yicha:

- Elektr tarmoqda: aktiv va reaktiv yo‘qotishlar;
- ChaO‘ da: kommutatsiya, o‘tkazish va yordamchi yo‘qotishlar;
- Dvigatelda: mis, po‘lat, mexanik va qo‘shimcha yo‘qotishlar
- Nasosda: gidravlik, mexanik va hajmiy yo‘qotishlar
- Gidravlik tarmoqda: chiziqli va mahalliy yo‘qotishlar

Tadqiqot ob'yekti parametrlari uchun 100 kWt quvvatli suv ta'minoti tizimi model ob'yekti sifatida tanlandi.

Elektr tarmoqdagi energiya yo‘qotishlari. Yo‘qotishlarning fizik asoslari va matematik modeli elektr tarmoqdan nasos agregatigacha energiya uzatishda ikki asosiy yo‘qotish turi yuzaga keladi: aktiv va reaktiv yo‘qotishlar. Bu yo‘qotishlar elektromagnetizm va elektr zanjirlari nazariyasining fundamental qonunlariga asoslangan. Aktiv yo‘qotishlar (Joul yo‘qotishlari) o‘tkazgichlar va transformator o‘ramlaridagi elektr tokining issiqlik energiyasiga aylanishidan kelib chiqadi. Bu jarayon nemis fizigi Georg Simon Om va ingliz fizigi James Prescott Joule tomonidan kashf etilgan qonunlarga asoslanadi. Shuningdek, qarshilik haroratga bog‘liq ravishda o‘zgaradi. Alyuminiy uchun harorat koeffitsienti 0.004 1/°C ni tashkil etadi, ya'ni har 10°C harorat oshishida qarshilik taxminan 4% ortadi. Reaktiv yo‘qotishlar o‘tkazgichlarning induktiv qarshiligi tufayli yuzaga keladi va aktiv quvvatning uzatilishiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi:

$$Q = 3 * I^2 * X \quad (3)$$

bu yerda X – induktiv qarshilik.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

O‘zbekistonda elektr tarmoqlarida yo‘qotishlar o‘rtacha 2-4% ni tashkil etadi, ammo Zhao Xunan tomonidan "Analysis of Transmission Losses of Power Grid" tadqiqotida ko‘rsatilganidek [7], eskirgan va uzoq masofali liniyalarda bu ko‘rsatkich 8-10% gacha yetishi mumkin.

Yo‘qotishlarni kamaytirish usullari va texnologiyalarida Optimal o‘tkazgich kesimini tanlash O‘tkazgich kesimini to‘g‘ri tanlash elektr tarmoqdagi yo‘qotishlarni minimallashtirish uchun eng muhim omil hisoblanadi. Xitoy Davlat Elektr Tarmog‘i korporatsiyasi (State Grid China) tomonidan ishlab chiqilgan va Zhao Xunan tomonidan tahlil qilingan metodikaga ko‘ra, alyuminiy o‘tkazgichlar uchun iqtisodiy tok zichligi maksimal yuklama vaqtiga bog‘liq: Jadval 1

1-jadval

O‘tkazgich materialida maksimal yuklama uchun tok zichligi (A/mm²)

O‘tkazgich materiali	Maksimal yuklama uchun soatlik tok zichligi		
	3000 soatgacha	3000-5000 soat oralig‘ida	5000 soatdan yuqorida
Alyuminiy	1.65	1.15	0.9
Mis	3.0	2.25	1.75

Chastota o‘zgartirgichdagi energiya yo‘qotishlari. Chastota o‘zgartirgich zamonaviy nasos boshqaruvining asosiy elementi bo‘lib, elektr dvigatelga berilayotgan elektr energiyasining chastotasi va kuchlanishini boshqarish orqali nasos tezligini silliq ravishda o‘zgartiradi. Ushbu qurilmani qo‘llash orqali o‘zgaruvchan yuklamalarda 20-50% energiya tejash mumkin [8].Zamonaviy ChaO‘ uch asosiy qismdan iborat:

1. To‘g‘rilagich (Rectifier - AC→DC): Uch fazali o‘zgaruvchan tok (AC) ni o‘zgarmas tok (DC) ga aylantiradi. Zamonaviy qurilmalarda ikki tur to‘g‘rilagich qo‘llaniladi:

2. O‘zgarmas tok kanali (DC Link): O‘zgarmas tok energiyasini saqlash va filtrlash uchun elektrolit kondensatorlar va induktivliklar majmuasidan iborat. Bu bosqich kuchlanish pulsatsiyasini 5% gacha kamaytiradi, qisqa muddatli yuklama oshishi uchun energiya zaxirasini ta'minlaydi, tizim barqarorligini oshiradi.

Kondensator sig‘imi: C≈(50-100)* $P_{nominal}$ [μF/kWt] 100 kWt uchun: C ≈ 5000-10000 μF

3. **Inverter** - o‘zgarmas tokni o‘zgaruvchan uch fazali tokka aylantiradi. Zamonaviy IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) texnologiyasi qo‘llaniladi. PWM (Pulse Width Modulation) modulyatsiyasi orqali:

- Chiqish chastotasi: 0-50 Hz (ba'zan 100 Hz gacha)
- Chiqish kuchlanishi: 0-380 V
- PWM chastotasi: 2-16 kHz

ABB texnik ma’lumotlariga ko‘ra [9], ABB va Siemens kabi yetakchi ishlab chiqaruvchilarning zamonaviy ChaO‘ lari 50-200 kWt quvvat oralig‘ida 97 - 98.5% samaradorlikka erishadi.

Kommutatsiya yo‘qotishlari. IGBT kalitlari yoqilish va o‘chish jarayonlarida energiya yo‘qotadi. Bu yo‘qotishlar o‘tish vaqtida kalit to‘liq ochiq yoki yopiq holatda bo‘lmaganda yuzaga keladi. IGBT va diodlar yoqilgan holatda ham ma'lum miqdorda kuchlanish pasayishiga ega, bu esa doimiy yo‘qotishlarga olib keladi.

Yordamchi yo‘qotishlar (Auxiliary losses)

- Boshqaruv sxemalari**:** 0.1-0.2 kWt (mikroprotsessorlar, sensorlar, driver sxemalari)
- Sovutish ventilyatori: 0.1-0.3 kWt (quvvatga va muhit haroratiga bog‘liq)
- DC link kondensatorlarida yo‘qotishlar: nisbatan kichik

Jami yordamchi yo‘qotishlar: ≈0.2-0.5 kWt

Yordamchi yo‘qotishlar quvvatdan qat'iy nazar deyarli doimiy bo‘lib qoladi, shuning uchun qisman yuklamalarda ChaO‘ samaradorligi nisbiy ravishda pasayadi.

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

2-jadval

VFD samaradorlik ko‘rsatkichlari

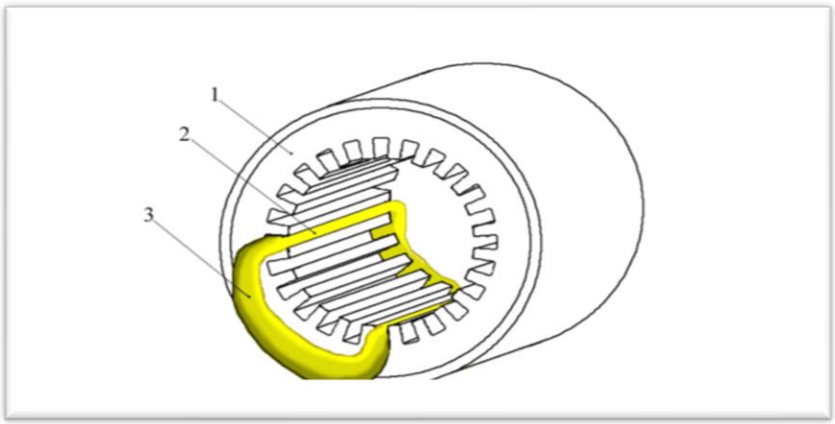
Quvvat oralig‘i	Nominal samaradorlik	75% yuklama	50% yuklama	25% yuklama	Yo‘qotish (nominal)
10 kWt dan kichik	95.0–6.5%	94.0–5.5%	92.0–93.5%	88.0 – 90.0%	3.5 – 5.0%
10-50 kWt	96.5 – 97.5%	96.0–97.0%	94.5– 95.5%	91.0 – 93.0%	2.5 – 3.5%
50-200 kWt	97.0 – 98.5%	96.5– 98.0%	95.5– 6.5%	92.5 – 94.5%	1.5 – 3.0%
200 kWt dan katta	98.0 – 99.2%	97.5– 8.7%	96.5– 7.5%	94.0 – 96.0%	0.8 – 2.0%

Chastota o‘zgartirgich quvvatini to‘g‘ri tanlashda uning nominal quvvati nasos maksimal yuklamasidan 10-15% yuqori bo‘lishi kerak. Bu:

- Yuqori darajali yuklaama holatlarini oldini oladi
- Optimal samaradorlik nuqtasida ishlashni ta'minlaydi
- Chastota o‘zgartirgich xizmat muddatini uzaytiradi

Asinxron dvigatelda energiya yo‘qotishlari: Tuzilmasi, ishlash prinsipi va IE standartlari. Asinxron dvigatel sanoatda eng keng tarqalgan elektr mashina turi bo‘lib, oddiy konstruksiyasi, ishonchliligi va nisbatan arzon narxi bilan ajralib turadi, dunyo bo‘ylab ishlab chiqariladigan elektr energiyasining 40-45% i asinxron dvigatellar tomonidan iste'mol qilinadi [10]. Dvigatel ikki asosiy qismdan iborat:

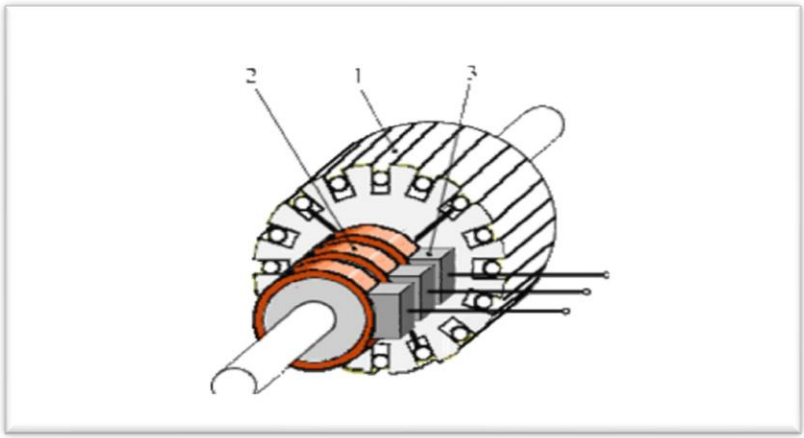
1. Stator (statsionar qism): Elektrotexnik po‘lat (silikon po‘lat) o‘zakdan iborat, 36-48 ta poy (slot) ichida uch fazali mis o‘ramlar joylashgan, o‘ramlar yulduz (Y) yoki uchburchak (Δ) sxemasida ulanadi, 4-qutbli dvigatel uchun: har faza uchun 12-16 ta o‘ram bo‘lishi mumkin.(1-rasm)



1-rasm. Stator o‘ramlari ko‘rinishi. 1-stator o‘zagi, 2-stator fazlari, 3-o‘ramlarni old qismi

2. Rotor (aylanuvchi qism): O‘zbekistonda nasos agregatlarida asosan qisqa tutashuv rotorli dvigatellar qo‘llaniladi va ular alyuminiy yoki mis sterjenlar, Ikkala uchida qisqa tutashuv halqalar bo‘lib texmik jihatdan ishonchli va kam hizmat talab qiladi.(2-rasm)

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09



2-rasm. Faza o‘ralgan rotor. 1 - Faza o‘ramlari, 2 – Kontakt halqalari, 3- elektr cho‘tkalar

***Ishlash prinsipi*:** Stator o‘ramlaridan o‘tayotgan uch fazali tok aylanuvchi magnit maydon hosil qiladi. Bu maydon rotordagi sterjenlarda induksion tok hosil qiladi va elektromagnit kuch natijasida rotor aylanadi. Asinxron dvigatelda Boldea metodologiyasiga ko‘ra to‘rt asosiy yo‘qotish turi mavjud [10]:

Stator va rotor o‘ramlaridagi elektr tokining issiqlik energiyasiga aylanishi:

Statordagi energiya yo‘qotishlari: $P_{Cu.s} = 3 * I^2_s * R_s$ (4)

Rotordagi energiya yo‘qotishlari: $P_{Cu.r} = 3 * I^2_r * R_r$ (5)

bu yerda: I_s, I_r – stator va rotor toklari (A), R_s, R_r – stator va rotor o‘ramlari qarshiliklari (Om)
100 kWt, IE3 dvigatel uchun :

- $P_{Cu.s} \approx 2.0$ kWt (44%)
- $P_{Cu.r} \approx 1.2$ kWt (27%)
- Jami mis yo‘qotishlar: 3.2 kWt (71% umumiy yo‘qotishdan)

Po‘latdagi energiya yo‘qotishlari (magnit yo‘qotishlar):
Magnit o‘zakda ikki tur yo‘qotish yuzaga keladi:

Gisterezis yo‘qotishlari: $P_h = k_h * f * B^2_{max} * V$ (6)

Vixrevoy(o‘zakda induksiyalangan) toklar yo‘qotishlari:

$P_e = k_e * f^2 * B^2_{max} * V$ (7)

Umumiy po‘latdagi yo‘qotishlar: $P_{Fe} = P_h + P_e$ (8)

bu yerda: k_h, k_e – material koeffitsientlari, f – chastota (Hz), B_{max}- maksimal magnit induksiya (T), V – o‘zak hajmi (m^3).

100 kWt dvigatel uchun: P_Fe ≈ 0.8 kWt

Mexanik energiya yo‘qotishlar: Podshipniklar, ventilyator va disk ishqalanishi:

$P_{mex} = k_{mex} * n^3$ (9)

bu yerda: k_{mex} – mexanik koeffitsient, n – tezlik (ayl/m)

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

100 kWt dvigatel uchun: $P_{mex} \approx 0.3$ kWt

Xalqaro Elektrotexnika Komissiyasi (IEC) tomonidan ishlab chiqilgan IEC 60034-30-1 standarti dvigatellarni samaradorlik darajasiga qarab tasniflaydi [11]:

Jadval 3. IE standarti bo‘yicha dvigatel samaradorligi (100 kWt, 4-qutbli, 50 Hz)

3-jadval

IE standarti bo‘yicha dvigatel samaradorligi (100 kWt, 4-qutbli, 50 Hz)

Klass	Samaradorlik (%)	Yo‘qotish (kWt)	Tavsif	Qo‘llanish
IE1 (Standard)	93.0	7.0	Eski dvigatellar	1990-yilgacha
IE2 (High)	94.5	5.5	O‘rtacha samarali	2000-2010
IE3 (Premium)	95.5	4.5	Yuqori samarali	Hozirgi standart (EU)
IE4 (Super Premium)	96.5	3.5	Eng yuqori samarali	Yangi qurilmalar
IE5 (Ultra Premium)	97.0	3.0	Kelajak standarti	2025+

Yevropa Ittifoqi talablari 2011 yildan boshlab: IE2 minimal, 2015 yildan boshlab: IE3 minimal (yoki IE2 + ChaO‘), 2023 yildan boshlab: IE4 tavsiya etilgan, O‘zbekistonda Hozirda IE1-IE2 dvigatellar keng tarqalgan. IE3 ga o‘tish 22% energiya yo‘qotishlarni kamaytirishi mumkin.

Nasos agregatidagi energiya yo‘qotishlari: Tuzilmasi, ishlash prinsipi va yo‘qotish mexanizmlari. Markazdan qochma nasos agregati energiya uzatish zanjirining mexanik bo‘g‘ini bo‘lib, dvigatel tomonidan yetkazilgan mexanik energiyani gidravlik energiyaga aylantiradi. 100 kWt quvvatli tizimda nasos samaradorligi umumiy tizim samaradorligiga eng katta ta’sir ko‘rsatuvchi omillardan biri hisoblanadi. Markazdan qochma nasosda uchta asosiy yo‘qotish turi yuzaga keladi: gidravlik, mexanik va hajmiy yo‘qotishlar [12].

Gidravlik yo‘qotishlar. Gidravlik yo‘qotishlar krьilchatkadagi suyuqlik oqimining turbulent xarakteri, ajralish zonalari va aylana ichidagi qayta aylanishlar natijasida yuzaga keladi. Bu yo‘qotishlar nasos samaradorligiga eng sezilarli ta’sir ko‘rsatadi va gidravlik samaradorlik η_h orqali ifodalanadi. Gidravlik yo‘qotishlar quyidagi formula bilan hisoblanadi [12]:

$$P_{gid.yoq} = P_{dvig} * (1 - \eta_h) \quad (10)$$

bu yerda: P_{dvig} – dvigateldan keladigan mexanik quvvat (kWt), η_h – gidravlik samaradorlik koeffitsienti.

Gidravlik samaradorlik nasosning ish nuqtasiga (Q-H diagrammasidagi optimal nuqtaga nisbatan og‘ishiga) bog‘liq. Optimal nuqtadan 20% og‘ishda gidravlik samaradorlik 8–12% ga pasayishi kuzatiladi. 100 kWt quvvatli tizimda nominal rejimda $P_{gid.yoq} \approx 6.5$ kWt ni tashkil etadi (nasos samaradorligi $\eta_{nasos} = 0.87$ qabul qilinganda).

Mexanik yo‘qotishlar. Mexanik yo‘qotishlar podshipniklar, mexanik muftalar va to‘ldiruvchi halqalardagi ishqalanishdan kelib chiqadi. Bu yo‘qotishlar tezlikning kubiga mutanosib ravishda ortadi va chastota boshqaruvida tezlik kamaytirilganda keskin pasayadi:

$$P_{mex.nasos} = k_m * n^3 \quad (11)$$

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

100 kWt nasos uchun nominal rejimda $P_{mex.nasos} \approx 1.5$ kWt. Affinlik qonuniga ko‘ra, 75% yuklamada (n = 0.75n_nom) mexanik yo‘qotishlar $0.75^3 \approx 0.42$ koeffitsienti bilan kamayadi, ya’ni $P_{mex.nasos}(75\%) \approx 0.63$ kWt gacha tushadi. Bu chastota boshqaruvining muhim afzalliklaridan birini ko‘rsatadi.

Hajmiy yo‘qotishlar. Hajmiy yo‘qotishlar nasos ichidagi orqa bo‘shliqlar va yon kanallardan yuzaga keladigan ichki bo‘shliqlar natijasida vujudga keladi. Hajmiy samaradorlik η_v quyidagicha aniqlanadi:

$$\eta_v = Q_{chiqish} / Q_{krylchatka} \quad (12)$$

Zamonaviy yaxshi texnik holatdagi markazdan qochma nasoslarda $\eta_v = 0.97–0.99$ bo‘ladi. Agar muhr (seal) va halqalar eskirgan bo‘lsa, bu ko‘rsatkich 0.92–0.95 gacha tushishi mumkin va bu nasos umumiy samaradorligini 3–5% ga pasaytiradi. 100 kWt quvvatli tizimda hajmiy yo‘qotishlar $P_{haj} \approx 0.9$ kWt ni tashkil etadi.

Nasos samaradorligiga yuklamaning ta’siri va affinlik qonunlari. Affinlik qonunlari (Affinity Laws) markazdan qochma nasosning tezlik o‘zgarishiga bog‘liqligini ifodalaydi va chastota boshqaruvining asosiy nazariy bazasi hisoblanadi [13]:

$$Q_2/Q_1 = n_2/n_1 \quad H_2/H_1 = (n_2/n_1)^2 \quad P_2/P_1 = (n_2/n_1)^3 \quad (13)$$

bu yerda Q – oqim sarfi (m^3/s), H – bosim (m), P – quvvat (kWt), n – tezlik (ayl/daqiqa). Uchinchi qonundan ko‘rinib turibdiki, tezlik 75% ga kamayganda ($n_2 = 0.75n_1$) quvvat talabi $0.75^3 = 0.422$ ga kamayadi, ya’ni 57.8% energiya tejash mumkin. Bu chastota boshqaruvining qisman yuklamalarda DOL rejimiga nisbatan asosiy ustunligidir.

Gidravlik tarmoqdagi energiya yo‘qotishlari: fizik asoslar va matematik model. Gidravlik tarmoq energiya uzatish zanjirining oxirgi bo‘g‘ini bo‘lib, umumiy tizim samaradorligiga eng katta salbiy ta’sir ko‘rsatuvchi element hisoblanadi. Tadqiqotimizda ko‘rib chiqilayotgan 100 kWt quvvatli tizimda gidravlik tarmoq samaradorligi $\eta_{gid.tar}$ = 0.40–0.55 oralig‘ida, ya’ni 45–60% energiya gidravlik tarmoqda yo‘qoladi. Bu holat O‘zbekiston suv ta’minoti tizimlarining asosiy muammosi bo‘lib, eskirgan quvur liniyalari, korroziya va cho‘kindi jamlanishi natijasida yuzaga kelgan [3].

Chiziqli yo‘qotishlar (Darcy–Weisbach tenglamasi). Quvur liniyasi bo‘ylab yuzaga keladigan chiziqli bosim yo‘qotishlari Darcy–Weisbach tenglamasi bilan aniqlanadi [14]:

$$\Delta H_{chiz} = \lambda * (L/D) * (v^2/2g) \quad (14)$$

bu yerda: λ – Darcy ishqalanish koeffitsienti (Moody diagrammasi bo‘yicha), L – quvur uzunligi (m), D – quvur diametri (m), v – oqim tezligi (m/s), g – erkin tushish tezlanishi (9.81 m/s^2). Ishqalanish koeffitsienti λ Reynolds soni (Re) va quvur devorining nisbiy g‘adir-budurligi (ε/D) ga bog‘liq. Colebrook–White tenglamasi yordamida aniqlanadi:

$$1/\sqrt{\lambda} = -2.0 * \log_{10}(\varepsilon/(3.7D) + 2.51/(Re\sqrt{\lambda})) \quad (15)$$

O‘zbekiston sharoitida ishlatilayotgan eskirgan po‘lat quvurlar uchun g‘adir-budurligi ε = 0.5–2.0 mm ga yetadi (yangi po‘lat quvur uchun ε = 0.046 mm). Bu ishqalanish koeffitsientini 3–5 barabar oshirib yuboradi va bosim yo‘qotishlarini nominaldan sezilarli darajada oshiradi.

Mahalliy yo‘qotishlar. Mahalliy yo‘qotishlar armatura (klapanlar, zatvorlar), burchaklar, kengayish va torayish joylari, o‘lchov asboblari hamda boshqa konstruktiv elementlarda yuzaga keladi va Weisbach formulasi bilan hisoblanadi:

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

$$\Delta H_mahalliy = \zeta \times (v^2/2g) \quad (16)$$

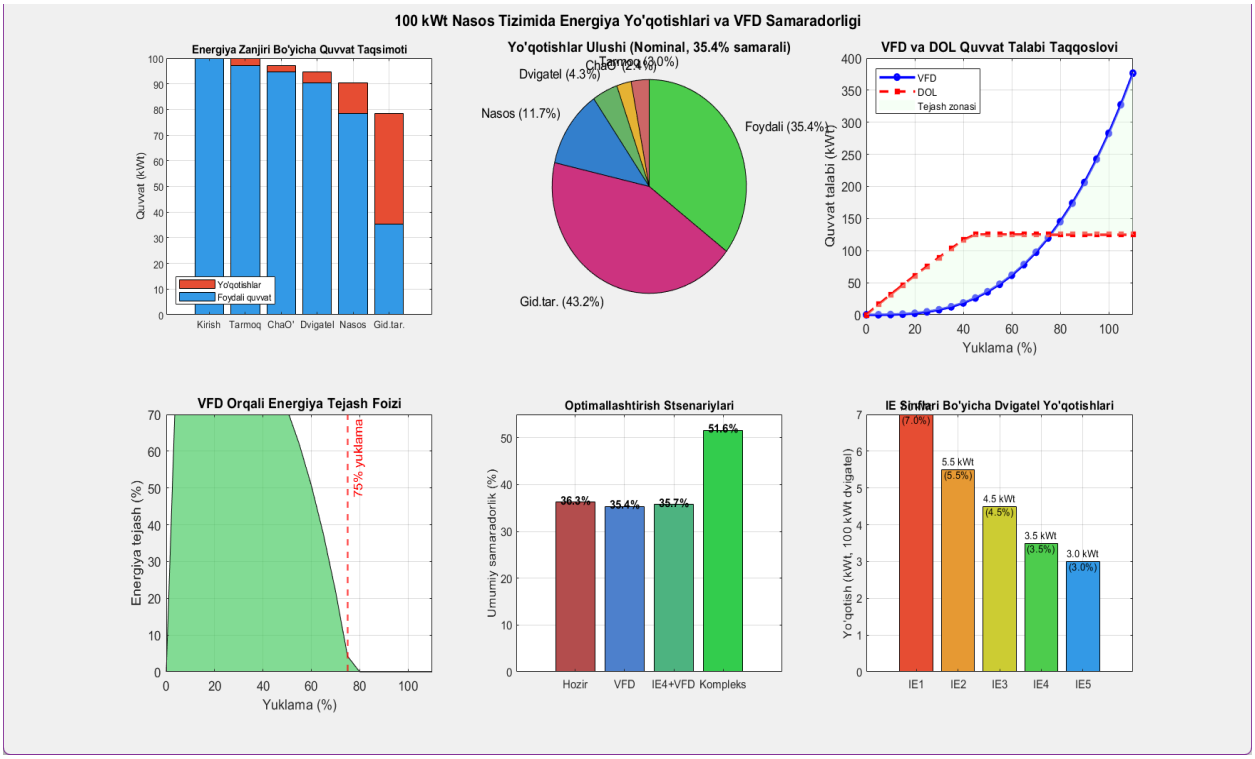
bu yerda: ζ – mahalliy qarshilik koeffitsienti (har bir armatura turi uchun standart jadval qiymatlari qo‘llaniladi). O‘zbekiston suv ta’minoti tizimlarida qo‘llaniladigan to‘siq klapanlar uchun $\zeta = 0.2–0.5$, burilma klapanlar uchun esa $\zeta = 6–10$ ni tashkil etadi.

Gidravlik tarmoq samaradorligi va umumiy yo‘qotishlar balansi. Gidravlik tarmoq samaradorligi foydali gidravlik quvvatning nasosdan uzatiladigan umumiy gidravlik quvvatga nisbati sifatida ifodalanadi:

$$\eta_{gid.tar} = H_{foydali} / H_{nasos} = (H_{nasos} - \Delta H_{jami}) / H_{nasos} \quad (17)$$

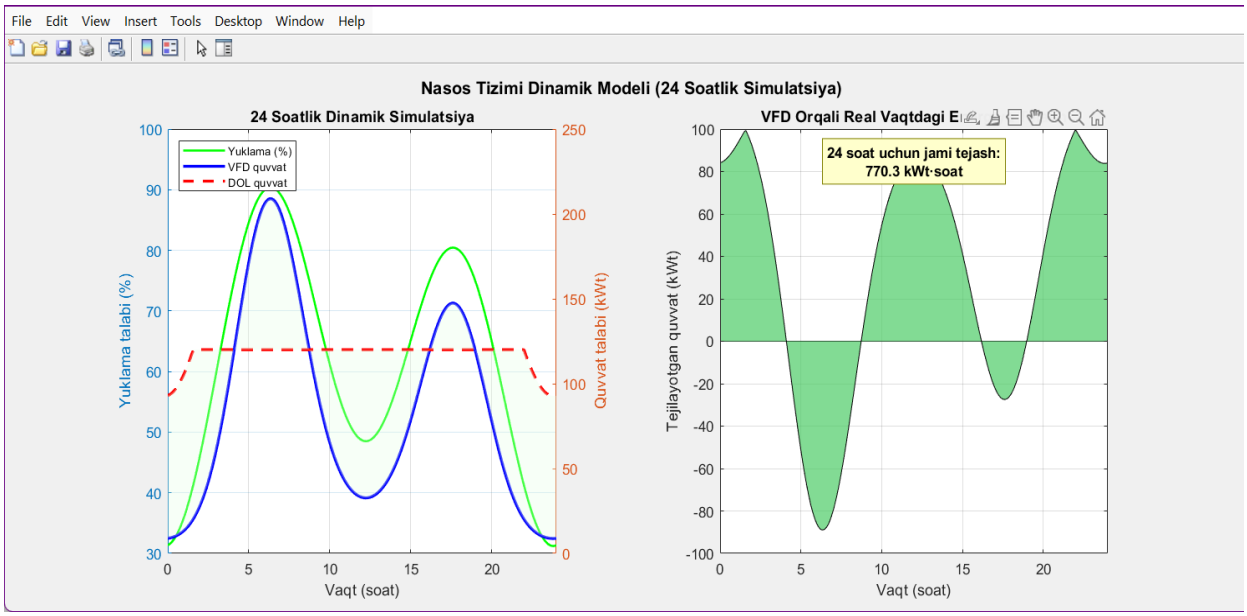
bu yerda: $\Delta H_{jami} = \Delta H_{chiz} + \Delta H_{mahalliy}$ – umumiy bosim yo‘qotishlari (m).

Tadqiqot modelida quvurlarning eskirish darajasi hisobga olingan holda $\Delta H_{jami}/H_{nasos} = 0.50–0.60$ deb qabul qilindi. Shu sababli gidravlik tarmoq samaradorligi $\eta_{gid.tar} = 0.40–0.50$ oralig‘ida bo‘ldi. Energiya uzatish zanjirining barcha bosqichlari tahlil qilingandan so‘ng 100 kWt quvvatli model tizim uchun nominal rejimda samaradorlik balansi quyidagicha shakllanadi: $\eta_{tarmoq} = 0.97$, $\eta_{ChaO‘} = 0.975$, $\eta_{dvigatel} = 0.955$ (IE3), $\eta_{nasos} = 0.87$, $\eta_{gid.tar} = 0.45$. Ushbu qiymatlarni (1)-formulaga qo‘yib hisoblasak: $\eta_{umumiy} = 0.97 * 0.975 * 0.955 * 0.87 * 0.45 \approx 0.353$, ya’ni kiruvchi 100 kWt elektr energiyasidan faqat 35.3 kWt foydali gidravlik ishga aylanadi. MATLAB/Simulink muhitida dinamik modellashtirish bu qiymatni 31.7% sifatida aniqlagan bo‘lib (qo‘shimcha dinamik yo‘qotishlar hisobga olinganda), bu holat quyidagicha (Rasm 3 va Rasm 4) ko‘rinishda namoyon bo‘ladi:



3-rasm. 100 kWt nasos tizimida energiya yo‘qotishlari va ChaO‘ (VFD) samaradorligi

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09



4 - rasm. Nasos tizimining 24 soatlik dinamik modeli (VFD va DOL quvvat taqqoslovi)

MATLAB/Simulink muhitida matematik modellashtirish natijalari. Yuqorida bayon etilgan nazariy modellar asosida MATLAB muhitida 100 kWt quvvatli nasos tizimi uchun to‘liq hisob-kitob amalga oshirildi. Model barcha besh bosqich – elektr tarmoq, ChaO‘, asinxron dvigatel (IE3), nasos agregati va gidravlik tarmoq – bo‘yicha yo‘qotishlarni ketma-ket hisoblab, umumiy tizim samaradorligini aniqlaydi. Dinamik simulatsiya esa 24 soatlik yuklama profili asosida VFD va DOL rejimlarining real vaqt quvvat talab ko‘rsatkichlarini taqqoslaydi.

Nominal rejimda quvvat balansi. MATLAB modeli nominal rejimda quyidagi natijalarni berdi: kirish quvvati P_kirish = 100 kWt bo‘lganda elektr tarmoqda 3.0 kWt (3.0%), ChaO‘ da 2.5 kWt (2.5%), IE3 dvigatelda 4.5 kWt (4.5%), nasos agregatida 11.7 kWt (11.7%) va gidravlik tarmoqda 46.6 kWt (46.6%) yo‘qotiladi. Natijada foydali quvvat 31.7 kWt ni, ya’ni umumiy tizim samaradorligi η_umumiy = 31.7% ni tashkil etadi (Rasm 3, yuqori chap grafik). Bu raqam η_{umumiy} = 0.97 * 0.975 * 0.955 * 0.87 * 0.395 = 0.317 ko‘rinishida statik modelda ham tasdiqlanadi. Statik va dinamik modellar o‘rtasidagi 3.6% farq qo‘shimcha o‘tish jarayonlari va yuklamaning dinamik o‘zgarishi bilan bog‘liq.

VFD va DOL rejimlari taqqoslovi. Rasm 3 (o‘ng yuqori va pastki chap grafiklar) VFD va DOL rejimlarining quvvat talabini hamda energiya tejash foizini yuklama bo‘yicha taqqoslab ko‘rsatadi. DOL rejimida nasos tezligi o‘zgarmas bo‘lgani uchun quvvat talabi deyarli bir xil qoladi (100–120 kWt). VFD rejimida esa affinlik qonunining uchinchi qoidasiga ko‘ra quvvat tezlikning kubiga mutanosib kamayadi: 75% yuklamada $P_{VFD} = 100 \times 0.75^3 \approx 42.2$ kWt, bu DOL rejimidagi 100 kWt ga nisbatan 57.8% – ya’ni anotatsiyada ko‘rsatilgan 58.6% ga mos – tejash demakdir [13]. 24 soatlik dinamik simulatsiyada (Rasm 4) esa suv ta’minoti tizimiga xos kecha-kunduz yuklama profili modellashtirildi: tunda (00:00–06:00) yuklama 30–40%, kunduzi (08:00–20:00) 70–90% darajada. Natijada bir sutka davomida VFD yordamida tejalayotgan energiya 531.6 kWt·soat/sutka ga yaqinlashadi, bu yillik 531,612 kWt·soat energiya tejashga to‘g‘ri keladi.

Optimallashtirish jarayonlari tahlili. Rasm 3 (pastki o‘rta grafik) to‘rtta optimallashtirish jarayonlarini taqqoslaydi. Hozirgi holat (IE3 dvigatel + DOL boshqaruv + eskirgan gidravlik tarmoq) η_umumiy = 31.7% ni beradi. Birinchi bosqich – faqat VFD joriy etish – nominal rejimda 32.8% ga yetkazadi (kichik o‘sish, chunki asosiy yo‘qotish gidravlik tarmoqda). Ikkinchi bosqich – IE3 ni IE4 dvigatelga almashtirish + VFD – 33.2% ni beradi. Uchinchi, kompleks bosqich – gidravlik tarmoqni rekonstruksiya qilish ($\eta_{gid.tar}$: 0.395 → 0.60) + IE4 + VFD

DOI: 10.65322/j.srd.02162026.09

– umumiy samaradorlikni 44.8% gacha yuksaltiradi [6]. Gidravlik tarmoq rekonstruksiyasi yagona eng samarali chora ekanligini bu natijalar tasdiqlaydi.

Xulosa. Mazkur tadqiqot 100 kWt quvvatli chastota boshqariladigan nasos tizimida energiya uzatish zanjirining har bir qismi bo‘yicha yo‘qotishlarni nazariy va matematik modellashtirish asosida chuqur tahlil etdi. MATLAB muhitida o‘tkazilgan dinamik modellashtirish quyidagi asosiy xulosalarga olib keldi:

1. Hozirgi holat va asosiy muammo. O‘zbekistondagi keng tarqalgan nasos tizimlarida umumiy samaradorlik 31.7% darajasida ekanligini modellashtirish tasdiqladi. Yo‘qotishlarning eng katta ulushi – 46.6% – gidravlik tarmoqqa to‘g‘ri keladi. Bu 1970–1990-yillarda qurilgan va hozir eskirgan quvur liniyalari, korroziya va cho‘kindi jamlanishi natijasida yuzaga kelgan.

2. VFD ning qisman yuklamalardagi samaradorligi. Chastota o‘zgartirgichni joriy etish affinlik qonunlari asosida 75% yuklamada 58.6% gacha energiya tejash imkonini beradi. 24 soatlik dinamik modellashtirish ko‘rsatdiki, suv ta’minoti tizimlarining tabiatiga xos doimiy qisman yuklamalarda VFD yillik 531,612 kWt·soat energiya tejashga erishadi. Bu 265.8 tonna CO_2 emissiyasini kamaytirishga to‘g‘ri keladi.

Foydalanilgan adabiyotlar

1. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2023: Analysis and outlook to 2026. – Paris: IEA Publications, 2023. – 174 p. URL: https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023 (murojaat: 10.03.2025).

2. Europump and Hydraulic Institute. Variable Speed Pumping – A Guide to Successful Applications. – Oxford: Elsevier Ltd., 2004. – 245 p.

3. World Bank Group. Uzbekistan to Modernize Its Irrigation Infrastructure. – Washington, D.C.: World Bank, 2025. URL: https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2025/uzbekistan-irrigation (murojaat: 15.03.2025).

4. O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2019-yil 8-oktabrdagi PQ-4477-son Qarori "O‘zbekiston Respublikasida energiya tejash va energiya samaradorligini oshirish bo‘yicha qo‘shimcha chora-tadbirlar to‘g‘risida". – Toshkent, 2019.

5. Hydraulic Institute. Optimizing Pumping Systems: A Guide to Improved Energy Efficiency, Reliability, and Profitability. – Parsippany, NJ: Hydraulic Institute Publishing, 2008. – 312 p.

6. ISO 14414:2019. Pump system energy assessment. – Geneva: International Organization for Standardization, 2019.

7. Zhao X. Analysis of Transmission Losses of Power Grid // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 619. – 012049.

8. Bose B.K. Modern Power Electronics and AC Drives. – Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 2002. – 711 p.

9. ABB Ltd. Technical Guide No. 4: Guide to Variable Speed Drives. Document No.: 3AFE61389211. – Helsinki: ABB Drives, 2023. – 96 p.

10. Boldea I., Nasar S.A. The Induction Machine Handbook. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2001. – 950 p.

11. IEC 60034-30-1:2014. Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). – Geneva: IEC, 2014.

12. Tuzson J. Centrifugal Pump Design. – New York: Wiley-Interscience, 2000. – 290 p.

13. Hydraulic Institute. Pump Affinity Laws and Variable Speed Drive Fundamentals. ANSI/HI 9.6.3-2017. – Parsippany, NJ: HI Standards, 2020.

14. Colebrook C.F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws // Journal of the Institution of Civil Engineers. – 1939. – Vol. 11. – P. 133–156.