UO‘K 621.224.2:621.313.33:621.314.572

ASINXRON DVIGATEL ISH REJIMLARINI ROSTLASH ORQALI MARKAZDAN QOCHMA NASOSLARNING BEP DA ISHLASHINI TA’MINLASH

U.T.Berdiyev
Toshkent Davlat transport universiteti professori
N.A.Samatov
Andijon qishloq xo‘jaligi va agrotexnologiyalar instituti professori
X.A.Mamajonov
Andijon qishloq xo‘jaligi va agrotexnologiyalar instituti assistenti
E-mail: mamajonovholmirza93@gmail.com
https://orcid.org/0009-0006-2688-6462

Annotatsiya: Ushbu maqolada asinxron elektr dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali markazdan qochma nasos agregatlarining optimal ishchi nuqtada (BEP — Best Efficiency Point) ishlashini ta’minlash masalasi tadqiq etilgan. Nasos agregatlarining amaliy ekspluatatsiyasi jarayonida ishchi nuqtaning BEP dan chetlanishi energiya samaradorligining pasayishiga, elektr energiyasi sarfining ortishiga hamda mexanik va gidravlik yo‘qotishlarning kuchayishiga olib kelishi ko‘rsatib berilgan. Tadqiqotda nasos va quvur tizimi xarakteristikalari, shuningdek, asinxron dvigatelning elektromexanik xususiyatlari yagona tizim sifatida tahlil qilingan. Asinxron dvigatel aylanish tezligini chastota o‘zgartirgich yordamida rostlash orqali nasos xarakteristikasini tizim qarshilik xarakteristikasiga moslashtirish va ishchi nuqtani BEP ga yaqinlashtirish imkoniyati asoslab berilgan. Olingan natijalar BEP rejimida ishlash nasos agregatlarining foydali ish koeffitsientini oshirishini, elektr energiyasi solishtirma sarfini kamaytirishini hamda ekspluatatsion barqarorlikni yaxshilashini tasdiqlaydi. Tadqiqot natijalari suv ta’minoti va irrigatsiya tizimlarida energiya tejamkor nasos agregatlarini boshqarish tizimlarini ishlab chiqishda qo‘llanilishi mumkin.

Kalit so‘zlar: Markazdan qochma nasos, optimal ishchi nuqta (BEP), asinxron elektr dvigatel, chastotali boshqaruv, energiya samaradorligi, nasos agregati, ishchi nuqta, elektr yuritma, gidravlik yo‘qotishlar, suv ta’minoti tizimlari.

Аннотация: В данной статье исследуется вопрос обеспечения работы центробежных насосных агрегатов в оптимальной рабочей точке (ОПТ — точка максимальной эффективности) путем регулирования режимов работы асинхронного электродвигателя. Показано, что в процессе практической эксплуатации насосных агрегатов отклонение рабочей точки от ППТ приводит к снижению энергоэффективности, увеличению энергопотребления и росту механических и гидравлических потерь. В исследовании анализируются характеристики насосно-трубопроводной

системы, а также электромеханические характеристики асинхронного двигателя как единой системы. Обоснована возможность регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с помощью частотного преобразователя для адаптации характеристик насоса к характеристикам сопротивления системы и приближения рабочей точки к ППТ. Полученные результаты подтверждают, что работа в режиме ППТ повышает полезную эффективность насосных агрегатов, снижает удельное энергопотребление и улучшает эксплуатационную стабильность. Результаты исследования могут быть использованы при разработке энергоэффективных систем управления насосными агрегатами в системах водоснабжения и орошения.

Ключевые слова: центробежный насос, оптимальная рабочая точка (BEP), асинхронный электродвигатель, частотное регулирование, энергоэффективность, насосный агрегат, рабочая точка, электропривод, гидравлические потери, системы водоснабжения.

Abstract: This article studies the issue of ensuring the operation of centrifugal pump units at the optimal operating point (BEP — Best Efficiency Point) by adjusting the operating modes of an asynchronous electric motor. It is shown that in the process of practical operation of pump units, the deviation of the operating point from BEP leads to a decrease in energy efficiency, an increase in electricity consumption, and an increase in mechanical and hydraulic losses. The study analyzes the characteristics of the pump and pipeline system, as well as the electromechanical characteristics of the asynchronous motor as a single system. The possibility of adjusting the asynchronous motor rotation speed using a frequency converter to adapt the pump characteristic to the system resistance characteristic and bring the operating point closer to BEP is substantiated. The results obtained confirm that operation in the BEP mode increases the useful efficiency of pump units, reduces the specific electricity consumption, and improves operational stability. The results of the study can be used in the development of energy-efficient control systems for pump units in water supply and irrigation systems.

Keywords: Centrifugal pump, best operating point (BEP), asynchronous electric motor, frequency control, energy efficiency, pump unit, operating point, electric drive, hydraulic losses, water supply systems.

Kirish

Hozirgi kunda suv ta’minoti, irrigatsiya va sanoat texnologik jarayonlarida markazdan qochma nasos agregatlari eng keng tarqalgan gidravlik qurilmalardan biri hisoblanadi. Turli tadqiqotlarga ko‘ra, nasos tizimlari umumiy elektr energiyasi iste’molining 20–25 % gacha qismini tashkil etadi. Ushbu tizimlarda energiya

ISSN 3030-3907

samaradorligini oshirish masalasi nafaqat iqtisodiy, balki ekologik va ekspluatatsion jihatdan ham dolzarb muammolardan biridir.

Amaliy tajribalar shuni ko‘rsatadiki, markazdan qochma nasoslarning katta qismi uzoq vaqt davomida optimal ishchi nuqtadan (BEP — Best Efficiency Point) chetlangan rejimlarda ishlatiladi. Bunday holatlarda nasos foydali ish koeffitsienti pasayadi, gidravlik va mexanik yo‘qotishlar ortadi, shuningdek, asinxron elektr dvigatelning ortiqcha tok tortishi, qizishi va tez eskirishi kuzatiladi. Natijada elektr energiyasi sarfi oshib, agregatlarning xizmat muddati qisqaradi.

Markazdan qochma nasoslarning ishchi nuqtasi nasos xarakteristikasi va tizim qarshilik xarakteristikasining kesishish nuqtasi bilan aniqlanadi. Tizim parametrlarining (sarf, bosim, gidravlik qarshilik) doimiy o‘zgarib turishi nasosning BEP rejimida barqaror ishlashiga salbiy ta’sir ko‘rsatadi. Shu sababli nasos agregatlarida ishchi nuqtani real vaqt rejimida BEP ga yaqin holda ushlab turish masalasi dolzarb ilmiy-amaliy vazifa hisoblanadi.

Mazkur muammoni hal etishda asinxron elektr yuritmaning ish rejimlarini rostlash muhim ahamiyat kasb etadi. Aylanish tezligini, elektromagnit momentni va dvigatel yuklanishini rostlash orqali nasosning gidravlik xarakteristikalarini moslashtirish va natijada ishchi nuqtani BEP ga yaqinlashtirish mumkin. Ayniqsa, chastota o‘zgartirgichlar yordamida boshqariladigan asinxron dvigatellar nasos agregatlarida energiya samaradorligini oshirish uchun keng imkoniyatlar yaratadi.

So‘nggi yillarda ilmiy tadqiqotlarda asinxron yuritmani rostlash asosida nasoslarni optimal rejimda ishlatishga qaratilgan yondashuvlar taklif etilgan bo‘lsa-da, ko‘plab ishlarda BEP ni boshqaruv tizimi uchun asosiy maqsadli nuqta sifatida tanlash yetarli darajada chuqur o‘rganilmagan. Shuningdek, nasos–dvigatel tizimining elektromexanik va gidravlik jarayonlarini birgalikda hisobga olgan holda BEP rejimini ta’minlash masalasi ilmiy jihatdan to‘liq yechim topmagan.

Ushbu maqolaning maqsadi — asinxron dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali markazdan qochma nasoslarning optimal ishchi nuqtada (BEP) ishlashini ta’minlash imkoniyatlarini tadqiq etish, energiya samaradorligini oshirish hamda ekspluatatsion ko‘rsatkichlarni yaxshilashdan iborat. Tadqiqotda nasos va asinxron elektr yuritmaning o‘zaro bog‘liq xarakteristikalari tahlil qilinadi hamda BEP rejimiga yo‘naltirilgan boshqaruv yondashuvining afzalliklari asoslab beriladi.

Adabiyotlar tahlili:Markazdan qochma nasos agregatlarining energiya samaradorligini oshirish masalasi uzoq yillardan buyon ilmiy tadqiqotlarning muhim yo‘nalishlaridan biri bo‘lib kelmoqda. Dastlabki tadqiqotlarda nasoslarning ish rejimlari asosan mexanik rostlash usullari, jumladan drossellash va bypass sxemalari orqali boshqarilgan. Ushbu usullar texnik jihatdan sodda bo‘lsa-da, energiya sarfining sezilarli darajada ortishiga va nasosning optimal ishchi nuqtadan chetlanishiga olib kelishi ko‘plab mualliflar tomonidan qayd etilgan.

ISSN 3030-3907

Keyingi ilmiy ishlarda markazdan qochma nasoslarning **optimal ishchi nuqtasi (BEP)** tushunchasi keng joriy etildi. BEP da nasosning foydali ish koeffitsienti maksimal qiymatga erishishi, gidravlik yo‘qotishlar minimum bo‘lishi va mexanik barqarorlikning ta’minlanishi isbotlangan. Bir qator tadqiqotlarda nasosning BEP dan chetlanib ishlashi oqibatida tebranishlar, kavitatsiya hodisalari va agregat elementlarining tez eskirishi yuzaga kelishi ko‘rsatib berilgan.

So‘nggi o‘n yilliklarda ilmiy adabiyotlarda nasos agregatlarini **asinxron elektr yuritma va chastota o‘zgartirgichlar yordamida rostlash** masalalariga alohida e’tibor qaratilmoqda. Tadqiqotchilar aylanish tezligini o‘zgartirish orqali nasos xarakteristikasini tizim qarshilik xarakteristikasiga moslashtirish mumkinligini va bu orqali energiya sarfini 20–40 % gacha kamaytirish mumkinligini aniqlashgan. Ayniqsa, Affinitet qonunlariga asoslangan tezlik rostlash usullari nasos tizimlarida keng qo‘llanila boshladi.

Biroq mavjud ishlarda asosan elektr energiyasini tejashga urg‘u berilib, **asinxron dvigatelning elektromexanik holati** va uning BEP bilan bog‘liqligi yetarlicha chuqur tahlil qilinmagan. Ko‘plab tadqiqotlarda dvigatel toki, sirpanishi va elektromagnit momentining o‘zgarishi nasosning ishchi nuqtasiga qanday ta’sir ko‘rsatishi ikkilamchi masala sifatida qaralgan. Natijada nasos–dvigatel tizimi yagona kompleks obyekt sifatida emas, balki alohida elementlar majmuasi sifatida o‘rganilgan.

Zamonaviy ilmiy ishlarning bir qismida nasos agregatlarida BEP ni saqlash uchun **adaptiv va intellektual boshqaruv algoritmlari** taklif etilgan. Fuzzy Logic, sun’iy neyron tarmoqlar va ANFIS asosidagi yondashuvlar nasos ish rejimlarini real vaqt rejimida optimallashtirish imkonini berishi ta’kidlanadi. Ushbu ishlarda asosan gidravlik parametrlar (sarf, bosim) asosida qaror qabul qilinadi, biroq asinxron dvigatelning ichki energetik ko‘rsatkichlari bilan bog‘liqlik yetarli darajada integratsiya qilinmagan.

Shunday qilib, adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, markazdan qochma nasoslarning BEP da ishlashini ta’minlash masalasi keng o‘rganilgan bo‘lsa-da, **asinxron elektr yuritmaning ish rejimlarini bevosita rostlash orqali BEP ni saqlash** muammosi ilmiy jihatdan to‘liq yoritilmagan. Nasos va dvigatelning o‘zaro bog‘liq elektromexanik va gidravlik jarayonlarini kompleks holda hisobga olgan tadqiqotlar yetarli emas.

Mazkur holat ushbu maqolada asinxron dvigatel ish rejimlarini rostlash asosida markazdan qochma nasoslarning optimal ishchi nuqtada ishlashini ta’minlash masalasini chuqur ilmiy tahlil qilish va yangi yondashuvlarni ishlab chiqish zarurligini asoslaydi.

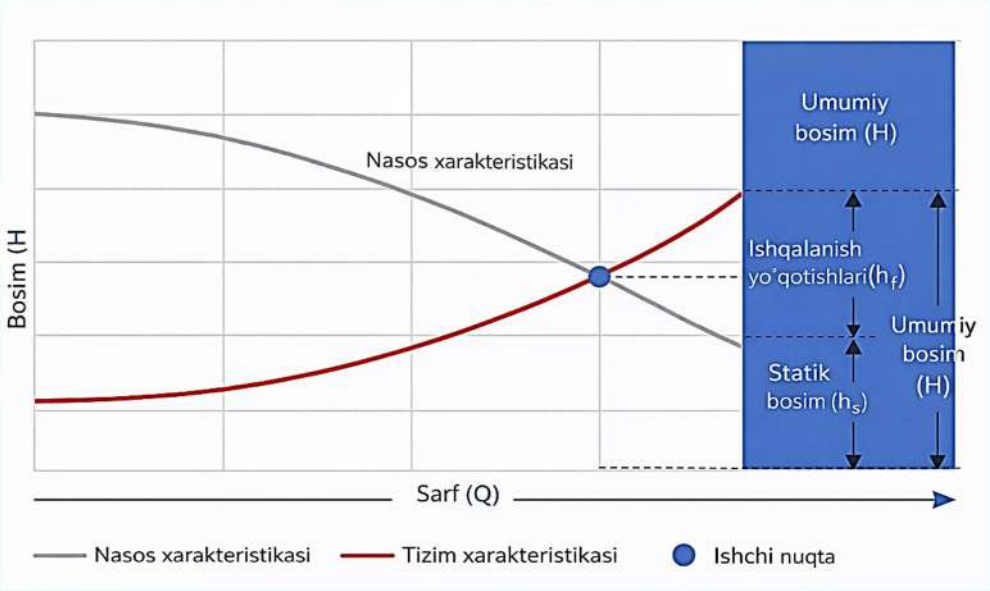
Tadqiqot metodologiyasi:

ISSN 3030-3907

Tadqiqot obyektlari va yondashuv: Tadqiqot obyekti sifatida **asinxron elektr dvigatel bilan harakatga keltiriladigan markazdan qochma nasos agregati** tanlandi. Tadqiqotning metodologik asosi nasosning gidravlik xarakteristikalari va asinxron dvigatelning elektromexanik xususiyatlarini yagona tizim sifatida qarashga asoslangan. Tadqiqotda asosiy e'tibor nasos ishchi nuqtasini **optimal ishchi nuqta (BEP)** ga yaqinlashtirish va ushbu rejimni asinxron dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali barqaror saqlashga qaratildi.

Metodologiya **nazariy tahlil, matematik modellashtirish va hisoblash tajribalari**ni o‘z ichiga oladi. Nasos va elektr yuritmaning o‘zaro ta'siri tizimli yondashuv asosida o‘rganildi.

Nasos va tizim xarakteristikalarini aniqlash: Markazdan qochma nasosning ish rejimi nasos xarakteristikasi $H_p(Q)$ va tizim qarshilik xarakteristikasi $H_s(Q)$ ning kesishish nuqtasi orqali aniqlanadi. Tadqiqotda nasos xarakteristikasi ishlab chiqaruvchi katalog ma'lumotlari va empirik bog‘lanishlar asosida aniqlanib, tizim qarshiligi quvur uzunligi, diametri va mahalliy yo‘qotishlar hisobga olingan holda ifodalandi.



1-Rasm: Nasos va tizim xarakteristikalarining kesishish grafigi.

Optimal ishchi nuqta BEP quyidagi shart asosida belgilandi:

$$\eta_p(Q) \rightarrow max$$

bu yerda η_p — nasosning foydali ish koeffitsienti, Q — sarf.

Asinxron dvigatel ish rejimlarini modellashtirish: Asinxron dvigatelning ish rejimi elektromagnit moment M, aylanish tezligi n va sirpanish s o‘rtasidagi bog‘lanish orqali tavsiflandi. Nasos yuklama momenti quyidagi ifoda bilan ifodalandi:

$$M_{yuk} = k \cdot n^2$$

bu yerda k — nasos konstruktiv koeffitsienti.

ISSN 3030-3907

Dvigatel tezligini rostlash chastota o‘zgartirgich orqali amalga oshirildi. Chastotani o‘zgartirish orqali dvigatelning aylanish tezligi va natijada nasos xarakteristikasi siljitildi. Shu orqali ishchi nuqtani BEP ga moslashtirish imkoniyati yaratildi.

BEP ga yo‘naltirilgan rostlash algoritmi: Tadqiqotda BEP **boshqaruv tizimi uchun maqsadli nuqta** sifatida qabul qilindi. Rostlash algoritmi quyidagi ketma-ketlikda amalga oshirildi:

- real vaqt rejimida sarf, quvvat va dvigatel toki aniqlanadi;
- nasosning joriy ishchi nuqtasi aniqlanadi;
- joriy nuqtaning BEP ga nisbatan og‘ishi baholanadi;
- asinxron dvigatel aylanish tezligi chastota orqali rostlanadi;
- ishchi nuqta BEP ga yaqinlashtiriladi va barqarorlashtiriladi.

Mazkur yondashuv nasos tizimidagi yuklama o‘zgarishlariga moslashuvchan bo‘lib, qisman yuklama sharoitida ham energiya samaradorligini saqlash imkonini beradi.

Baholash mezonlari: Tadqiqot natijalarini baholash quyidagi asosiy mezonlar orqali amalga oshirildi:

- nasos foydali ish koeffitsientining o‘zgarishi;
- elektr energiyasi solishtirma sarfi (kWh/m³);
- asinxron dvigatel toki va quvvatining kamayishi;
- BEP dan chetlanish darajasi;
- ekspluatatsion barqarorlik ko‘rsatkichlari.

Mazkur mezonlar asosida asinxron dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali nasosning BEP da ishlashini ta’minlash samaradorligi baholandi.

Tahlil va natijalar:Tadqiqot jarayonida markazdan qochma nasos agregatining ishchi nuqtasi nasos xarakteristikasi va tizim qarshilik xarakteristikasining o‘zaro kesishishi asosida aniqlanib, ushbu nuqtaning optimal ishchi nuqta (BEP) ga nisbatan joylashuvi tahlil qilindi. Dastlabki holatda nasos agregati o‘zgarmas aylanish tezligida ishlatilganda ishchi nuqtaning BEP dan sezilarli darajada chetlangani kuzatildi. Bu holat nasos foydali ish koeffitsientining pasayishiga va elektr energiyasi sarfining ortishiga olib kelgan.

Asinxron dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali aylanish tezligi o‘zgartirilganda nasos xarakteristikasining siljishi sodir bo‘ldi va natijada ishchi nuqta tizim xarakteristikasi bo‘ylab BEP ga yaqinlashdi. Tezlikni kamaytirish orqali nasos hosil qiladigan bosim va sarf optimal qiymatlarga moslashtirildi. Bu jarayon ayniqsa qisman yuklama sharoitlarida yaqqol namoyon bo‘ldi.

Tahlil natijalari shuni ko‘rsatdiki, ishchi nuqtaning BEP ga yaqinlashishi bilan nasosning foydali ish koeffitsienti oshdi va gidravlik yo‘qotishlar kamaydi. Shu bilan birga asinxron dvigatel toki pasayib, elektromagnit va issiqlik

ISSN 3030-3907

yo‘qotishlarining kamayishi qayd etildi. Natijada nasos agregatining umumiy energiya samaradorligi sezilarli darajada yaxshilandi.

Elektr energiyasining solishtirma sarfi (kWh/m³) tahlili shuni ko‘rsatdiki, BEP dan uzoq rejimlarda ishlash holatiga nisbatan, rostlangan ish rejimida energiya sarfi 20–30 % gacha kamaydi. Bu natija asinxron dvigatelning optimal yuklanish rejimida ishlashi bilan bevosita bog‘liq bo‘lib, dvigatel sirpanishining kamayishi va moment–tezlik moslashuvining yaxshilanishi bilan izohlanadi.

Bundan tashqari, BEP atrofida ishlash nasos agregatining mexanik barqarorligiga ham ijobiy ta’sir ko‘rsatdi. Tebranish darajasi va gidravlik zarbalar kamaydi, bu esa podshipniklar va muhrlarning xizmat muddatini uzaytirish imkonini beradi. Ushbu holat nasos agregatlarining ekspluatatsion ishonchliligini oshirish nuqtai nazaridan muhim ahamiyatga ega.

Olingan natijalar shuni ko‘rsatadiki, asinxron dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali nasosning ishchi nuqtasini BEP ga yo‘naltirish nafaqat energiya tejamkorligini oshiradi, balki nasos–dvigatel tizimining umumiy texnik holatini barqarorlashtiradi. Bu yondashuv suv ta’minoti va irrigatsiya tizimlarida keng qo‘llash uchun ilmiy va amaliy jihatdan asoslangan yechim hisoblanadi.

Xulosa

Ushbu tadqiqotda asinxron elektr dvigatel ish rejimlarini rostlash orqali markazdan qochma nasos agregatlarining optimal ishchi nuqtada (BEP) ishlashini ta’minlash imkoniyatlari tahlil qilindi. O‘tkazilgan nazariy va hisoblash tahlillari shuni ko‘rsatdiki, nasos agregatlarining amaliy ekspluatatsiyasi jarayonida ishchi nuqta ko‘pincha BEP dan chetlangan holatda bo‘lib, bu holat energiya samaradorligining pasayishiga va ekspluatatsion yo‘qotishlarning ortishiga olib keladi.

Tadqiqot natijalari asinxron dvigatel aylanish tezligini rostlash orqali nasos xarakteristikasini tizim qarshilik xarakteristikasiga moslashtirish va natijada ishchi nuqtani BEP ga yaqinlashtirish mumkinligini tasdiqladi. Ishchi nuqtaning BEP atrofida barqaror saqlanishi nasosning foydali ish koeffitsientini oshirishi, elektr energiyasi solishtirma sarfini kamaytirishi hamda dvigatelning elektromexanik yuklanishini optimallashtirishi aniqlandi.

Shuningdek, BEP rejimida ishlash nasos agregatlarida gidravlik yo‘qotishlarning kamayishiga, tebranish va shovqin darajasining pasayishiga olib kelishi aniqlanib, bu holat agregatlarning xizmat muddatini uzaytirish imkonini beradi. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, asinxron elektr yuritmani BEP ga yo‘naltirilgan holda rostlash nasos tizimlarining umumiy texnik va energetik samaradorligini oshirishda muhim omil hisoblanadi.

Takliflar

ISSN 3030-3907

Olingan ilmiy natijalar asosida quyidagi amaliy va ilmiy takliflar ishlab chiqildi:

- Suv ta’minoti va irrigatsiya nasos stansiyalarida asinxron dvigatellarni chastota o‘zgartirgichlar orqali boshqarishni joriy etish va nasos agregatlarini BEP atrofida ishlashini ta’minlash tavsiya etiladi.
- Nasos–dvigatel tizimlarini loyihalash jarayonida nasosning BEP ko‘rsatkichlari asinxron dvigatelning nominal ish rejimlari bilan mos holda tanlanishi zarur.
- Energiya monitoring tizimlarida dvigatel toki, quvvati va sarf parametrlarini kuzatish orqali ishchi nuqtaning BEP ga nisbatan og‘ishini aniqlash va avtomatik rostlash algoritmlarini joriy etish maqsadga muvofiq.
- Keyingi tadqiqotlarda BEP rejimini saqlash uchun intellektual boshqaruv algoritmlarini (Fuzzy Logic, ANFIS, sun’iy neyron tarmoqlar) qo‘llash orqali tizimning moslashuvchanligi va aniqligini oshirish tavsiya etiladi.
- O‘tkazilgan tadqiqot natijalari nasos agregatlarining ekspluatatsion samaradorligini oshirish bo‘yicha normativ-texnik hujjatlarni ishlab chiqishda va modernizatsiya loyihalarida qo‘llanilishi mumkin.

FOYDALANILGAN ADABIYOTLAR

1. Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). *Pump Handbook* (4th ed.). McGraw-Hill, New York.
2. Gülich, J. F. (2014). *Centrifugal Pumps*. Springer, Berlin–Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12824-0
3. Stepanoff, A. J. (1993). *Centrifugal and Axial Flow Pumps*. Krieger Publishing Company, Florida.
4. Boldea, I., & Nasar, S. A. (2010). *Electric Drives*. CRC Press, Boca Raton.
5. Bose, B. K. (2017). *Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends*. Academic Press, Elsevier.
6. Sulzer Pumps. (2010). *Centrifugal Pump Handbook*. Sulzer Ltd., Winterthur.
7. Pereira, J. L., & Souza, Z. J. (2012). Energy efficiency improvement of pumping systems through variable speed drives. *Energy Efficiency*, 5(1), 11–21. https://doi.org/10.1007/s12053-011-9121-5
8. Ahonen, T., & Laitinen, J. (2015). Estimation of centrifugal pump operating point based on motor electrical signals. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(5), 2924–2932. https://doi.org/10.1109/TIE.2014.2364532
9. Yang, S., Kong, F., & Chen, Y. (2018). Optimal efficiency control of centrifugal pump systems based on variable frequency drive. *Applied Energy*, 230, 1313–1324. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.041

ISSN 3030-3907

10. Abdelmalek, S., Chaabene, M., & Derbel, N. (2016). Fuzzy logic control of centrifugal pump for efficiency optimization. *Energy Conversion and Management*, 122, 265–276. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.076
11. Nasir, A., & Riaz, M. (2019). Energy-efficient operation of centrifugal pumps using variable speed control. *Journal of Cleaner Production*, 210, 748–758. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.053
12. Kim, J., Park, J., & Lee, S. (2020). BEP-based adaptive control of pump systems using induction motor drives. *IEEE Access*, 8, 118746–118757. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3004723
13. Norboev, A. E. (2024). Speed regulation of asynchronous machines using mathematical modeling. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net
14. Samatov, N. A. (2023). Research of a controlled asynchronous electric drive in dynamic modes. *Agriculture of Uzbekistan*, Special Issue (2), 45–52.
15. Karimjonov, D., Makhsudov, M., Xalimjanov, A., Abdukhalilov, D., Axmedov, D., & Mamajonov, X. (2024). Modeling the structures of three-phase asynchronous motor reactive power variations. *AIP Conference Proceedings*, 3244(1), 060018. https://doi.org/10.1063/5.0201234

ISSN 3030-3907