

ТЕРМОДИНАМІЧНІ ІМПЕРАТИВИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Встановлено взаємозв'язок термодинамічних та гідравлічних параметрів мережі централізованого теплопостачання. Визначено залежність споживаної електричної потужності електроприводом насосного агрегату від гідравлічного напору та кількості подачі теплоносія. Доведено, що система регульованого електроприводу має переваги над системою нерегульованого електроприводу в контексті енергоефективності насосного агрегату та мережі централізованого теплопостачання загалом. Визначено підходи та критерії до синтезу системи регульованого електроприводу, в тому числі системи його автоматичного керування. Проаналізовано методи регулювання та обрано найбільш прийнятний варіант електроприводу: керований перетворювач частоти – асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. З урахуванням вище наведеного, синтезовано енергозберігаючу електромеханічну систему мережі централізованого теплопостачання. Особливістю цієї системи є те, що дотримання параметрів гідравлічного та температурного режимів в мережі централізованого теплопостачання забезпечується за допомогою екстремальних систем автоматичного керування. При цьому завдання режимних параметрів здійснюється температурним регулятором теплообмінного пункту мережі. Регулювання напору та продуктивності насосного агрегату здійснюється за рахунок зміни, за певним законом, частоти та напруги живлення асинхронного двигуна.

Ключові слова: *термодинамічні параметри, насосний агрегат, регульований електропривід, енергозберігаюча електромеханічна система централізованого теплопостачання.*

Вступ. На сучасному етапі в електроприводі насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання, широко застосовуються трифазні асинхронні електродвигуни, які живляться безпосередньо від електричної мережі. Така спрощена система електроприводу насосних агрегатів дозволяє значно зменшити капітальні інвестиції, що в умовах обмеженості фінансових ресурсів підприємств комунальної теплоенергетики України, відіграє важливу роль. Проте, вона не дозволяє повноцінно регулювати технологічні процеси, обумовлені зміною термодинамічних параметрів в теплових мережах систем централізованого теплопостачання, що призводить до додаткових експлуатаційних витрат та зниження показників енергоефективності. Перманентне підвищення цін на енергоносії, зокрема на електроенергію тільки загострює цю проблему. Одним із напрямів вирішення цієї проблеми, може стати модернізація електроприводів насосних агрегатів, які експлуатуються, в теперішній час, з урахуванням вимог обумовлених термодинамічними параметрами мережі централізованого теплопостачання.

Питання енергоефективності електроприводу насосних агрегатів, в основному розглядаються в працях зарубіжних вчених, і вони стосуються здебільшого роботи насосних агрегатів в системах водопостачання, які не ставлять вимог до термодинамічних параметрів, а лише до гідравлічних. На практиці, більшу частину часу відцентрові насосні установки експлуатуються при низьких або середніх навантаженнях, що відбувається через зміну технологічних параметрів, при цьому насоси проектується таким чином, щоб задовольняти максимальні навантаження [1]. У публікації [2] оцінено, що 75% відцентрових насосних агрегатів мають завищену потужність електроприводу, чимало їх більш, ніж на 20%. У публікації [3] вказується, що лише 20% електродвигунів у насосних агрегатах працюють за номінальної потужності. У публікаціях [4, 5] проводиться порівняння енергоспоживання насосного агрегату з електродвигунами різних типів та класів ІЕ з частотно-регульованим приводом, оскільки при частотному регулюванні досягається значна економія енергії, особливо в умовах малих навантажень.

У даній роботі досліджується вплив термодинамічних параметрів мережі централізованого теплопостачання, таких як температура, тиск та об'єм подачі теплоносія на гідравлічні параметри, а саме на гідравлічний напір, гідравлічний опір мережі та витрати теплоносія для забезпечення необхідного температурного графіка. У зв'язку з цим розглядається робоча гіпотеза, що названі параметри прямо впливають на споживану насосними агрегатами електричну потужність, та визначають як їх енергоефективність, так і загальний рівень енергоефективності мережі централізованого теплопостачання.

Мета роботи. Метою роботи є обґрунтування взаємозв'язку термодинамічних та гідравлічних параметрів тепломережі та визначення підходів до вибору типу та синтезу структури електроприводу насосних агрегатів для підвищення їх енергоефективності та енергоефективності мережі централізованого тепlopостачання загалом.

Матеріал і результати роботи. Як об'єкт дослідження в даній роботі обрано реальну найбільш типову мережу централізованої системи тепlopостачання підприємства комунальної теплоенергетики, де має місце кількісно-якісний метод регулювання температурного режиму. При цьому подача теплоносія регулюється за допомогою засувки, тобто має місце дросельне регулювання продуктивності насосного агрегату. Обстеження реальної теплової мережі показали, що за температурного графіка 95-70 фактичні витрати та подача теплоносія складає 1063 м³/год., максимальна подача (витрата) теплоносія 1200 м³/год., перепад тиску на насосі 12/4.8 атмосфер.

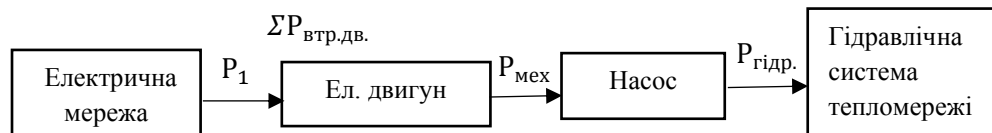


Рисунок1- Структура типового насосного агрегату мережі централізованого тепlopостачання

В мережі встановлено насосний агрегат, де в якості насоса використовується відцентровий насос ЦН-400-105 [6]. Для приводу насоса використовується асинхронний двигун класу ефективності типу 1LE1503-3AB52-2AA4 потужністю 200кВт та обертами 1450 [7]. При цьому для забезпечення режиму роботи має місце паралельна робота трьох насосних агрегатів.

Гідравлічна потужність визначається витратою Q та напором насоса $H_{\text{нас}}$. Напір насоса залежить від витрати відповідно до характеристики Q - H насоса при заданій частоті обертання насоса n . Отже, необхідна електрична потужність електроприводу P_1 залежить від витрати теплоносія Q та напору насоса H [8]:

$$P_1 = \rho g Q H_{\text{нас}} + \Sigma P_{\text{втр.нас}} + \Sigma P_{\text{втр.дв}} \quad (1);$$

де ρ – щільність теплоносія, g – прискорення вільного падіння.

Отже для визначення споживання електроенергії електроприводом насосного агрегату необхідно розрахувати такі параметри, як напір та подачу теплоносія. За умови, що частота обертання насоса не регулюється, його продуктивність та напір змінюються дроселюванням, наслідком чого є значні втрати електроенергії в електроприводі. Зміна частоти обертання робочого колеса насоса призводить до зміни всіх його характеристик і, в першу чергу його продуктивності та напору. Перерахунок характеристик насоса на іншу частоту обертання здійснюється за допомогою формул приведення,

Робота насосного агрегату розглядається в режимах, де витрата теплоносія протягом циклу роботи насосного агрегату змінюється відповідно до гідравлічного навантаження, характерного для HVAC додатків. Типовий цикл роботи насоса (рис. 2), визначений регламентом Євросоюзу [9] і поділений на 4 режими. Особливістю циклу є те, що більшу частину часу насос працює з витратою набагато меншою за номінальну. Наприклад, з витратою 25 % від номінального значення насос працює відносний час $t_i/t_{\Sigma} = 44$ %, де t_{Σ} – сумарний час роботи, прийнятий рівним 24 годинам, t_i – час роботи насоса в даному режимі. Цей профіль навантаження є типовим для насосних систем із потребою у зміні витрати в широких межах.

Дослідження проведені в теплових мережах підприємств комунальної теплоенергетики в середньостатистичному вимірі підтверджують такий профіль навантаження мережевих насосних агрегатів.

У першому варіанті дослідження до модернізації, електродвигун вмикається у мережу безпосередньо, тобто швидкість двигуна не регулюється протягом циклу, а подача теплоносія насосом Q регулюється за допомогою засувки, тобто має місце дросельне регулювання. Напір теплоносія у цьому випадку змінюється відповідно до кривої Q - H насоса, а робоча точка є точкою перетину характеристики насоса та характеристики гідравлічної системи.

На рис. 3 наведено напірні характеристики насоса за різних частот обертання та гідравлічні характеристики тепломережі за різних теплових та гідравлічних режимів роботи.

З рис.3 видно, що при зміні частоти обертання насоса, його напірна характеристика переміщається по гідравлічних характеристиках трубопроводу мережі централізованого тепlopостачання, що призводить до зменшення його продуктивності та напору, а отже до зменшення споживаної електроприводом електричної потужності. Таким чином регульований тип електроприводу, в контексті енергоефективності, має переваги перед не регульованим.

Синтез структури регульованого електроприводу здійснюється за декількома критеріями, а саме: технологічними вимогами; за терміном окупності; вимогою до надійності в експлуатації, тощо.

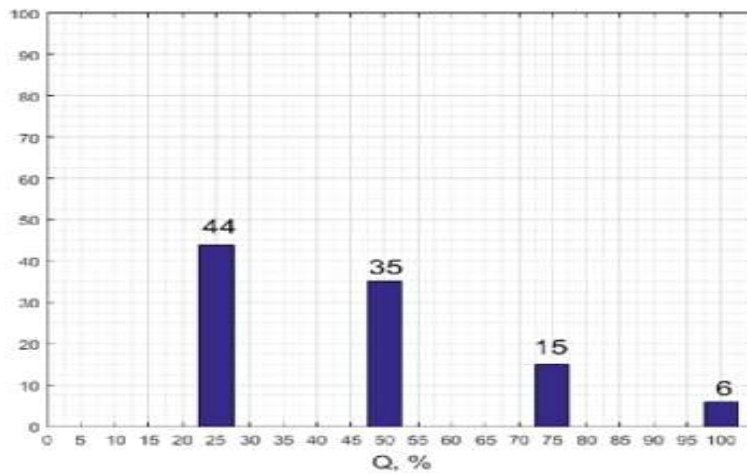


Рисунок 2 - Часова залежність витрати теплоносія за цикл [9]

З технологічної точки зору для досягнення потрібного значення подачі теплоносія в мережі, насосні агрегати об'єднуються в насосну станцію, в даному дослідженні мова йде про три насосні агрегати. При цьому кожен з насосних агрегатів впливає на роботу інших насосних агрегатів цієї групи. Це призводить до того, що подача, тиск, потужність і коефіцієнт корисної дії насосної станції суттєво залежить від режимів навантаження насосних агрегатів, що працюють спільно.

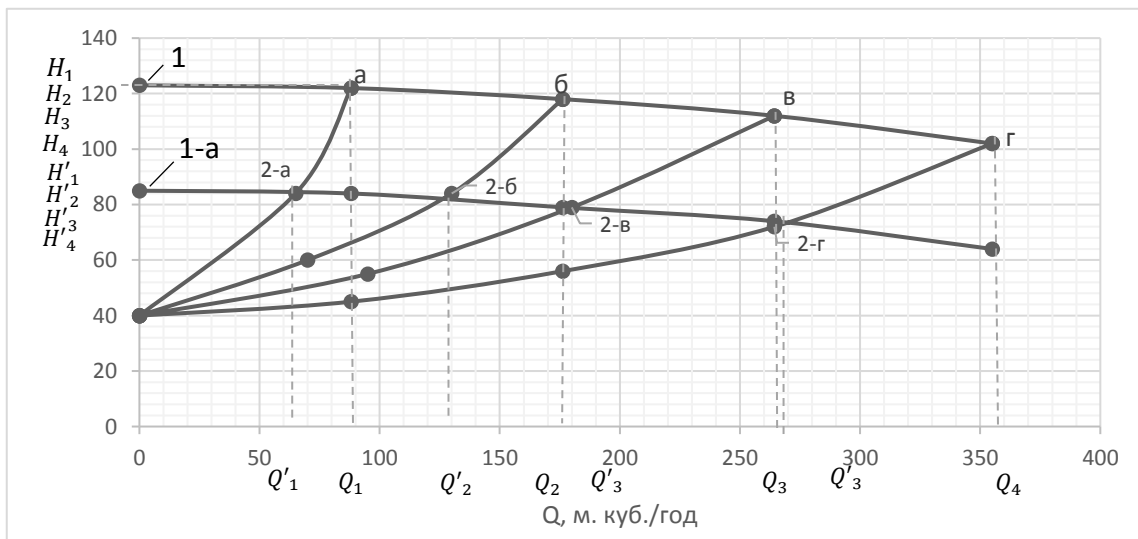


Рисунок 3 - Напірні характеристики насоса: (1) – при частоті обертання $n1$; (1-a) - при частоті обертання $n2$; $n2 < n1$ [6]. Гідравлічні характеристики мережі за різних теплових навантажень: 2-а; 2-б; 2-в; 2-г [розраховано авторами]

Насосна станція тепломережі працює за змінним графіком, це означає, що система автоматичного керування має забезпечити потрібні параметри, оскільки невідповідність параметрів призводить до зниження коефіцієнта корисної дії насосних агрегатів, і до додаткових витрат електроенергії. До особливостей роботи насосних станцій слід віднести те, що вони оснащені обладнанням, яке зазвичай має завищену потужність, тому насосні агрегати станції працюють із зниженим значенням коефіцієнта корисної дії. Крім того значна протяжність теплотраси та різна висота подачі теплоносія спричиняють нерівномірність розподілу тиску, що призводить до витоків теплоносія, та до зниження енергоефективності тепломережі. Таким чином, як показують результати аналізу термодинамічних параметрів, які отримані в даному дослідженні, для досягнення енергоефективного режиму роботи насосних станцій, їхню продуктивність необхідно регулювати зміною продуктивності насосних агрегатів, що працюють у їх складі.

Існують різні методи регулювання насосних агрегатів, які працюють у складі насосних станцій. Сучасний стан розвитку техніки дозволяє реалізовувати різні методи регулювання електроприводу, а саме: частотне регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором; електропривід на базі асинхронного вентильного каскаду; електропривід на основі використання електродвигунів постійного струму; електропривід з використанням електромагнітних муфт ковзання[12]. Аналіз результатів практичного використання електроприводів насосних агрегатів показує, що в діапазоні потужностей електроприводів необхідних для мережі централізованого теплопостачання, найбільш прийнятним варіантом є система електроприводу керований перетворювач частоти – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором[13].

У випадку якщо на насосній станції встановлено регульовані і не регульовані електроприводи насосних агрегатів необхідно застосовувати не лише зміну частоти обертання насосних агрегатів, але і зміну кількості працюючих нерегульованих електроприводів[14].

Вище наведене висуває вимоги до застосування на насосних станціях сучасних систем автоматизації[15]. Серед таких вимог слід назвати: підтримання заданого значення тиску на виході групи насосних агрегатів; контроль за роботою насосів і перемикання на резервний насос при аварії робочого; перемикання на роботу насосів від мережі при аварії перетворювача частоти; автоматичне підключення одного або двох додаткових насосів при недостатній продуктивності робочого (для станцій з кількістю насосів більшою 2); автоматичне чергування ввімкнених насосів через задані інтервали часу для забезпечення рівномірного завантаження насосів; забезпечення оперативного керування режимом роботи перетворювача частоти безпосередньо з панелі керування станції; можливість запуску і зупинки кожного насоса кнопками в режимі ручного керування прямим пуском від мережі; видача на диспетчерський пульт сигналів про режими роботи станції[16].

З урахуванням вимог може бути синтезована функціональна схема енергозберігаючої електромеханічної системи автоматичного керування насосного агрегату.

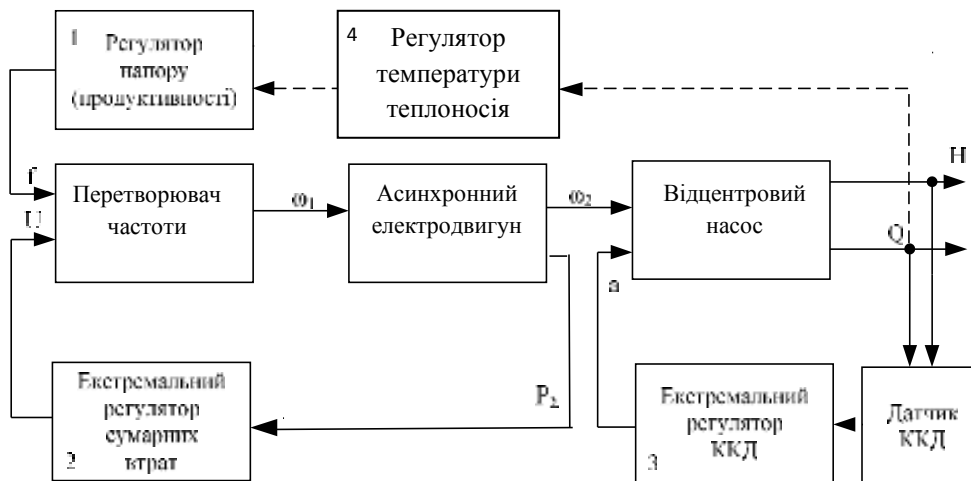


Рисунок. 4 - Функціональна схема енергозберігаючої електромеханічної системи насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання

Особливістю цієї системи є те, що стабілізація параметрів гідравлічної характеристики Q або H здійснюється за допомогою основного регулятора 1, а їх завдання – екстремальними системами автоматичного регулювання ККД електроприводу та ККД насоса (регуляторами 2; 3). Взаємозв'язок температурного режиму з гідравлічним забезпечує температурний регулятор (регулятор 4) теплообмінного пункту мережі централізованого теплопостачання. Регулювання напору та продуктивності здійснюється за рахунок зміни, за певним законом частоти та напруги живлення асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Висновки: Дослідження проведені в реальній типовій мережі централізованого теплопостачання, підтверджують гіпотезу про те, що термодинамічні параметри, а саме температурний графік, параметри зовнішнього середовища, технологічні особливості функціонування мережі, мають визначальний вплив на гідравлічний режим роботи насосного агрегату, а отже на обсяг споживаної його електроприводом електроенергії. Відповідно до цього формуються вимоги до типу регульованого електроприводу та синтезу його автоматизованої системи керування. Найбільш прийнятним варіантом регульованого електроприводу з точки зору забезпечення енергоефективності є електропривід, за системою, керований перетворювач частоти – асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором, при цьому автоматизована система

керування електроприводом побудована на основі екстремальних регуляторів. Подальші дослідження мають бути спрямовані на визначення впливу окремих складових системи електроприводу на його відповідність термодинамічним, технологічним вимогам та вимогам щодо енергоефективності.

Список використаної літератури.

1. Gevorkov L. Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2017.
2. Shuvalova J. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2004.
3. Glover A., Lukaszczyk M. Oversizing pump motors – the problems. *World Pumps*, 2005, vol. 2005, no. 466, pp. 36-38. doi: 10.1016/s0262-1762(05)70638-6.
4. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Calculation of the efficiency and power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30-2. 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Jan. 2018. doi: 10.1109/IWED.2018.8321381.
5. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144. doi: 10.3390/en12061144
6. Сумська насосна техніка <https://sumnt.com/>
7. Catalog D 81.1: SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors - December 2022 <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109749197/catalog-d-81-1-simotics-gp-sd-xp-dp-low-voltage-motors-december-2022?dti=0&lc=en-UA>
8. Лезнов Б. С. Л 41 Частотно-регулируемый электропривод насосных установок. — М.: Машиностроение, 2013. — 176 с., ил.
9. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
10. European Commission Regulation (EC) No. 640/2009 implementing Directive 2005/32/ EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Electric Motors, (2009), amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
11. Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). IEC 60034-30-1/ Ed. 1; IEC: 2014-03. <https://webstore.iec.ch/publication/136>
12. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с. http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf
13. Каталог ABB Приводы ABB для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха <https://global.abb.com/group/en>
14. Каталог ABB Двигатели и генераторы <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
15. Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання А. О. Лозинський, доктор технічних наук, професор В. М. Кутін, доктор технічних наук, професор Грабко, В. В.
16. Система керування запуском насосного агрегата станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – Випуск 30. – С. 310–311.

M. Fedirko¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-8244-3478

R. Holovko¹, student;

¹West Ukrainian National University

THERMODYNAMIC IMPERATIVES THE MODERNIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS OF THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY NETWORK IN THE CONTEXT OF INCREASEING ENERGY EFFICIENCY

The relationship between thermodynamic and hydraulic parameters of the heat supply network has been established. The dependence of the electric power consumed by the electric drive of the pump unit on the pressure and supply of the coolant was determined. It is proved that the regulated electric drive system has advantages over

the non-regulated electric drive system in the context of energy efficiency of the pumping unit and the district heating network in general. Approaches and criteria for the synthesis of a regulated electric drive system, including its automatic control system, were determined, regulation methods were analyzed, and the most acceptable version of the electric drive was chosen: a controlled frequency converter - an asynchronous motor with a short-circuited rotor, taking into account the above, an energy-saving mechanical system of a centralized heat supply network was synthesized. The peculiarity of this system is that the protection of parameters of hydraulic and temperature regimes in the network of centralized heat supply is ensured with the help of extreme automatic control systems. At the same time, the assignment of mode parameters is provided by the temperature controller of the heat exchange point of the network. Regulation of the pressure and productivity of the pumping unit is carried out by changing, according to a certain law, the frequency and power supply of the asynchronous motor.

Keywords: *thermodynamic parameters, pump unit, adjustable electric drive, energy-saving electromechanical system of the pump unit.*

References

1. Gevorkov L. Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2017.
2. Shuvalova J. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. PhD Thesis, Tallinn University of Technology, 2004.
3. Glover A., Lukaszczuk M. Oversizing pump motors – the problems. *World Pumps*, 2005, vol. 2005, no. 466, pp. 36-38. doi: 10.1016/s0262-1762(05)70638-6.
4. Safin N., Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V. Calculation of the efficiency and power consumption of induction IE2 and synchronous reluctance IE5 electric drives in the pump application based on the passport specification according to the IEC 60034-30- 2. 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED), Jan. 2018. doi: 10.1109/IWED.2018.8321381.
5. Kazakbaev V., Prakht V., Dmitrievskii V., Ibrahim M., Oshurbekov S., Sarapulov S. Efficiency Analysis of Low Electric Power Drives Employing Induction and Synchronous Reluctance Motors in Pump Applications. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 6, p. 1144. doi: 10.3390/en12061144
6. Sumy pumping equipment <https://sumnt.com/>
7. Catalog D 81.1: SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors - December 2022 <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109749197/catalog-d-81-1-simotics-gp-sd-xp-dp-low-voltage-motors-december-2022?dti=0&lc=en-UA>
8. Leznov B. S. L 41 Frequency-regulating electric drive of pump installations. — M.: Mashinostroenie, 2013. — 176 p., illustrations.
9. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by the Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
10. European Commission Regulation (EC) No. 640/2009 implementing Directive 2005/32/ EC of the European Parliament and of the Council with Regard to Ecodesign Requirements for Electric Motors, (2009), amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
11. Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE code). IEC 60034-30-1/Ed. 1; IEC: 2014-03. <https://webstore.iec.ch/publication/136>
12. Modes of operation of pump and fan installations with an automated electric drive: training. manual / T.V. Korenkova, O.O. Serdyuk, V.G. Kovalchuk. – Kremenchuk: Publishing House PP Shcherbatykh O. V., 2013. – 200 p. http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf
13. ABB catalog ABB drives for heating, ventilation and air conditioning systems <https://global.abb/group/en>
14. ABB catalog Engines and generators <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
15. Method and means of optimizing the operation of electric drives of a water supply pumping station A. O. Lozynskiy, Doctor of Technical Sciences, Professor V. M. Kutin, Doctor of Technical Sciences, Professor Grabko, V.V.
16. Moshnoriz M. The control system for starting the pumping unit of the water supply station / Mykola Moshnoriz, Volodymyr Grabko // *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*. – 2008. – Issue 30. – P. 310–311.

Надійшла:09.01.2024

Received:09.01.2024