

Федірко Михайло Миколайович, к.е.н., доц., доцент; Тел. (+38)0953318168; E-mail: m.fedirko@wunu.edu.ua

Бруханський Руслан Феокистович, д.е.н., проф., зав. кафедри; Тел. (+38)0506097776; E-mail: r.brukhanskyi@wunu.edu.ua

Брич Василь Ярославович, д.е.н., проф., директор ННІПІ; Тел. (+38)0677435080; E-mail: v.brych@wunu.edu.ua

Олішинська Руслана Русланівна, студентка групи ЕЛЕА-21; Тел. (+38)0987593061; E-mail: rusiaolishinska@gmail.com

Західноукраїнський національний університет, вул. Львівська 11, Тернопіль, Україна, 46009

МОДЕРНІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В КОНТЕКСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. Визначено кількісні та якісні показники модернізації електроприводу насосного агрегату мережі з дросельним регулюванням подачі теплоносія централізованої системи теплопостачання. Обґрунтовано можливість модернізації електроприводу шляхом заміни електродвигунів застарілої конструкції класу енергоефективності IE1, котрі дотепер застосовуються в електроприводах насосних агрегатів на електродвигуни класів енергоефективності IE2 та IE3 різних виробників. Розрахунок енергоспоживання проводився на основі технічних даних насоса і електродвигунів, що надаються виробниками, і включає в себе розрахунок енергоспоживання насосних агрегатів в типовому робочому циклі, характерному для мереж централізованого теплопостачання, що передбачає роботу зі зниженим навантаженням протягом тривалого часу. Отримано порівняльні розрахункові дані по добовому і річному енергоспоживанню розглянутих електродвигунів в типовому робочому циклі насосного агрегату, щодо найменш енергоефективного електродвигуна з розглянутих. Практичне значення отриманих результатів, полягає в розумінні того, що вибір електродвигуна за ККД при змінному навантаженні, тобто фактично на основі присвоєного відповідно до стандарту IEC 60034-30-1 класу енергоефективності IE є некоректним, Обґрунтовано що вибір має здійснюватися за допомогою ККД інтерпольованого методом поліноміальної інтерполяції кривої втрат електродвигуна, при цьому необхідно враховувати економічну доцільність вибору електродвигуна між класами енергоефективності, в даному випадку IE2 та IE3, та різними виробниками.

Ключові слова: насосні агрегати, дросельне регулювання, асинхронні електродвигуни, клас енергоефективності, коефіцієнт корисної дії.

Fedirko Mykhailo, Ph. D., (Econom.), Docent, Docent; Tel. (+38)0953318168; E-mail: m.fedirko@wunu.edu.ua

Brukhanskyi Ruslan, Doctor of Economics, Prof., head departments; Tel. (+38) 0506097776; E-mail: r.brukhanskyi@wunu.edu.ua

Brych Vasyl, doctor of economics, professor, director of the National Institute of Scientific Research; Tel. (+38) 0677435080; E-mail: v.brych@wunu.edu.ua

Olishynska Ruslana, a student of the ELEA-21 group; Tel. (+38) 0987593061; E-mail: rusiaolishinska@gmail.com
Western Ukrainian National University, str. Lvivska 11, Ternopil, Ukraine, 46009

MODERNIZATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMPING UNITS OF THE DISTRICT HEATING NETWORK IN THE CONTEXT OF INCREASING THEIR ENERGY EFFICIENCY

Abstract. Quantitative and qualitative indicators of the modernization of the electric drive of a pumping unit of a network with throttle control of the coolant supply of a centralized heat supply system are determined. The possibility of modernizing the electric drive by replacing outdated electric motors of energy efficiency class IE1, which are still used in electric drives of pumping units, with electric motors of energy efficiency classes IE2 and IE3 from different manufacturers, has been substantiated. The energy consumption was calculated based on the technical data of the pump and electric motors provided by the manufacturers and includes the calculation of the energy consumption of pumping units in a typical operating cycle typical for district heating networks, which involves operation at reduced load for a long time. Comparative calculated data on the daily and annual energy consumption of the considered electric motors in a typical operating cycle of a pumping unit, with respect to the least energy-efficient electric motor among those considered, were obtained. The practical significance of the results obtained is to understand that the selection of an electric motor by efficiency at variable load, i.e., actually

on the basis of the IE energy efficiency class assigned in accordance with the IEC 60034-30-1 standard, is incorrect, It is substantiated that the choice should be made using the efficiency interpolated by the method of polynomial interpolation of the motor loss curve, while taking into account the economic feasibility of choosing an electric motor between energy efficiency classes, in this case IE2 and IE3, and different manufacturers.

Keywords: *pumping units, throttle control, asynchronous electric motors, energy efficiency class, efficiency.*

Актуальність теми дослідження. На сучасному етапі в технологічних процесах, що мають місце в різних галузях народного господарства, в тому числі в електроприводі насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання, широко застосовуються трифазні асинхронні електродвигуни, які живляться безпосередньо від електричної мережі. Це пов'язано з тим, що електроприводи названих насосних агрегатів, в більшості випадків не вимагають широкого діапазону регулювання, значного пускового моменту і швидкодії. Такий підхід до вибору системи електроприводу насосних агрегатів дозволяє значно спростити його структуру та зменшити капітальні інвестиції, що в умовах обмеженості фінансових ресурсів підприємств комунальної теплоенергетики України відіграє важливу роль. В той же час слід зазначити що така спрощена система електроприводу не дозволяє повноцінно регулювати технологічні процеси в теплових мережах систем централізованого теплопостачання, що призводить до додаткових експлуатаційних витрат зокрема у контексті економії електроенергії. 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 шляхом заміни електродвигунів застарілої конструкції з низьким класом енергоефективності на більш енергоефективні електродвигуни.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання енергоефективності електроприводу насосних агрегатів в основному розглядаються в працях зарубіжних вчених, і вони стосуються в основному роботи насосних агрегатів в системах водопостачання. На практиці, більшу частину часу відцентрові насосні установки експлуатуються при низьких або середніх навантаженнях, що відбувається через зміну технологічних параметрів, при цьому насоси проектуються, 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] оцінено, що лише 20% електродвигунів у насосах 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. Тим не менш, зважаючи на збереження в багатьох галузях, масового застосування нерегульованого електроприводу, у ряді робіт проводиться порівняння характеристик електродвигунів, які працюють безпосередньо від мережі. Так

у публікації [6] проводився порівняльний аналіз асинхронного двигуна класу енергоефективності ІЕЗ і синхронного двигуна з постійними магнітами у складі вентиляційної установки в пусковому і усталеному режимах. Даний аналіз показує, що ККД та коефіцієнт потужності синхронного двигуна з постійними магнітами істотно вищий, ніж у асинхронного двигуна. Проте цей аналіз проводився для умов номінального навантаження. У публікації [7] розглядається робота синхронного двигуна з постійними магнітами у складі насосного агрегату. Порівнюються характеристики пропонованої конструкції електродвигуна з результатами моделювання в номінальному режимі насосної установки за умов пуску з високим моментом інерції. У статті [8] розглядається електропривід насосного агрегату та характеристики усталеного та перехідного режимів роботи асинхронного двигуна і синхронного двигуна з постійними магнітами у номінальному режимі та на холостому ходу.

Одним з основних висновків публікацій [4-8] є наявність переваги синхронного двигуна з постійними магнітами над асинхронним двигуном за такими параметрами як ККД та коефіцієнт потужності. Зауважимо, однак, що в даних публікаціях порівняння асинхронного двигуна та синхронного двигуна з постійними магнітами проводиться переважно для режимів роботи з номінальним навантаженням. У цих статтях розглядаються режими роботи асинхронного двигуна і синхронного двигуна з постійними магнітами у складі насосного агрегату зі змінним навантаженням, що залежить від споживання води, наприклад, у великій будівлі.

Як бачимо, питанням роботи насосних агрегатів у складі систем централізованого теплопостачання не приділяється належної уваги не тільки в працях вітчизняних, але і зарубіжних науковців.

У цьому дослідженні розглядається можливість модернізації електроприводу мережевих насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання в контексті підвищення їх енергоефективності. Як робоча гіпотеза висувається припущення, що заміна електродвигунів застарілої конструкції на електродвигуни вищого класу енергоефективності дозволить зменшити енергоспоживання підприємств комунальної теплоенергетики та зменшити негативний вплив на довкілля.

Метою роботи є: за допомогою порівняльного аналізу визначити кількісні та якісні параметри такої модернізації.

Виклад основного матеріалу. За даними Міжнародного енергетичного агентства, електродвигуни споживають 46% електроенергії, яка загалом споживається у світі. На їх частку припадає близько 70% загального промислового споживання електроенергії [9]. Тому підвищення енергетичної ефективності насосних агрегатів загалом та їх електроприводу зокрема у системі централізованого опалення, значною мірою залежить від класу енергоефективності електродвигунів і є важливим практичним завданням.

Мінімальний рівень енергетичної ефективності електродвигунів визначено у Регламенті ЄС[10], щодо екодизайну електродвигунів. Класи енергоефективності ґрунтуються на значеннях, зазначених у Документі[11]. Відповідно до Регламенту Євросоюзу [10] з 1 січня 2017 року всі електродвигуни потужністю від 0,75 до 375 кВт повинні мати клас енергоефективності не нижче ІЕ3 або ІЕ2, у разі якщо вони використовуються у складі частотно-регульованого приводу. До 2030 року слід очікувати введення мінімального допустимого класу енергоефективності не нижче ІЕ4.

Класифікація електродвигунів у Документах [10] і [11] ґрунтується лише на ККД у номінальному режимі роботи, тобто при номінальній потужності на валу, але не враховує ККД електродвигунів при частковому навантаженні, яке характерне для електродвигунів у складі насосних агрегатів.

Із моменту затвердження стандарту МЕК 60034-30: 2008 та його переглянутої версії МЕК 60034-30-1:2014, до низьковольтних трифазних асинхронних двигунів застосовується міжнародна система класифікації енергоефективності. Цей стандарт визначає міжнародні класи енергоефективності (ІЕ) для одношвидкісних, трифазних асинхронних двигунів частотою 50 Гц та 60 Гц. Рівні ефективності, що визначені у стандарті МЕК 60034-30-1, ґрунтуються на методі випробування, який описаний у стандарті МЕК 60034-2-1:2014. Обидва стандарти призначені для уніфікації процедур тестування двигунів зі стандартами CSA390-10 та IEEE 112, а також вимог до енергоефективності та маркування продуктів (ІЕ), щоб покупці у всьому світі мали змогу визначити рівень ефективності виробів. Незважаючи на те, що МЕК як міжнародна організація зі стандартизації, визначає керівні принципи для випробувань двигунів та класів енергоефективності, вона не регулює рівні ефективності двигунів у окремих країнах.

Уніфікація міжнародних стандартів та постійне розповсюдження мінімальних стандартів енергоефективності у всьому світі є необхідною процедурою сучасного екодизайну. Однак важливо пам'ятати, що уніфікація стандартів є безперервним процесом. Незважаючи на те, що стандарти МЕРS діють у декількох регіонах та країнах, вони постійно змінюються та включають різні обсяги та вимоги. В той же час все більше країн планують прийняти свої власні мінімальні стандарти енергоефективності.

В цьому контексті Кабінетом Міністрів України була прийнята Постанова від 27 лютого 2019 року № 157 «Про затвердження Технічного регламенту вимог до екодизайну для електродвигунів» [16]. Цим Технічним регламентом визначаються вимоги до екодизайну щодо введення в обіг та експлуатацію електродвигунів, у тому числі вмонтованих в інші продукти.

Характеристики насосного агрегату та електродвигунів. На рис. 1 зображено типовий насосний агрегат тепломережі систем централізованого теплопостачання. До складу насосного агрегату входить трифазний асинхронний електродвигун, що живиться безпосередньо від електричної мережі, який приводить в рух відцентровий насос, що працює на гідравлічну систему тепломережі.

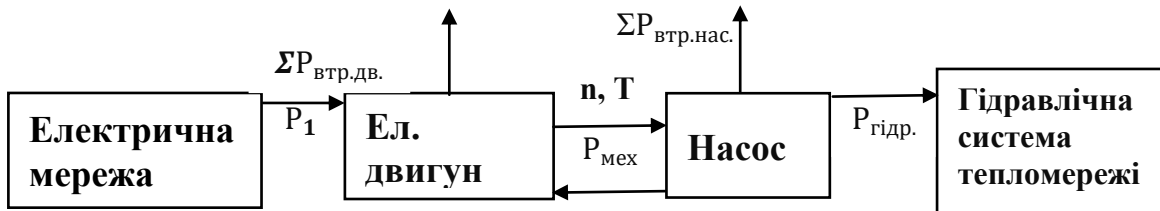


Рис. 1. Насосний агрегат тепломережі.

Споживана приводом активна потужність P_1 перетворюється електродвигуном в механічну потужність $P_{\text{мех}}$. Потужність $P_{\text{мех}}$ менша за P_1 на величину втрат в електродвигунів [17]:

$$P_{\text{мех}} = P_1 - \Sigma P_{\text{втр.дв}}, \quad (1)$$

де $\Sigma P_{\text{втр.дв}}$ – сумарні втрати електродвигуна.

Механічна потужність електродвигуна $P_{\text{мех}}$ передається на насос і, отже, за відсутності проміжних механічних передач, дорівнює вхідній механічній потужності насоса. У насосі механічна потужність $P_{\text{мех}}$ перетворюється на гідравлічну потужність $P_{\text{гідр}}$, яка є різницею між $P_{\text{мех}}$ та $\Sigma P_{\text{втр.нас}}$ в насосі [17]:

$$P_{\text{гідр}} = P_{\text{мех}} - \Sigma P_{\text{втр.нас}}. \quad (2)$$

Гідравлічна потужність насоса може бути визначена також за формулою

$$P_{\text{гідр}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\text{ККД}_{\text{нас}}}, \quad (3)$$

де $P_{\text{мех}}$ – механічна потужність насоса визначена за графіком рис. 5
ККД – коефіцієнт корисної дії насоса визначений за графіком рис. 4.

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 P_1 залежить від витрати Q [17]:

$$P_1 = \rho g Q H_{\text{нас}} + \Sigma P_{\text{втр.нас}} + \Sigma P_{\text{втр.дв}}, \quad (4)$$

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

Як об'єкт дослідження в даній роботі обрано реальну найбільш типову теплову мережу централізованої системи теплопостачання підприємства комунальної теплоенергетики де має місце кількісно-якісний метод регулювання температурного режиму. При цьому подача теплоносія регулюється за допомогою засувки.

Для порівняння енергоспоживання електродвигунів насосної установки при регулюванні витрати за допомогою засувки розглядався відцентровий насос. Обстеження теплових мереж показали, що фактичні витрати та подача теплоносія складає 1063 м³/год., максимальна подача (витрати теплоносія 1200 м³/год.), перепад тиску на насосі 12/4.8 атмосфер.

В мережі встановлено насосний агрегат, де в якості насоса використовується насос ЦН-400-105. При цьому для забезпечення режиму роботи має місце паралельна робота трьох насосів. Технічні дані насоса наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Паспортні характеристики насоса тепломережі [18]

Параметр	Значення
Тип	ЦН-400-105
P , кВт	200
n , об/хв	1450
$Q_{\text{ВЕР}}$, м ³ /ГОД	400
$H_{\text{ВЕР}}$, м	105
ККД, %	80
$t_{\text{доп}}$, °С	100
Доп.кав.запас, м	4.5

Для приводу насоса використовується електродвигун АО-103-4М технічні характеристики якого наведені в таблиці 2. Модернізації електроприводу передбачає заміну цього двигуна застарілої конструкції класу енергоефективності ІЕ1 на електродвигун аналогічної потужності та обертів класу енергоефективності ІЕ2, ІЕ3. Розрахунок проводився для різних асинхронних електродвигунів потужністю 200 кВт, та синхронної

швидкості 1500 об/хв, різних класів енергоефективності. Технічні характеристики електродвигунів наведені у табл. 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики електродвигунів приводу насосного агрегату [19-21]

№	Тип	P, кВт	n, об/хв	ККД	Клас енергоефективності
1	АО103-4М	200	1450	92,5	1Е1
2	МЗВР315MLB4	200	1487	96,0	1Е3
3	МЗВР315MLA4	200	1486	95,6	1Е2
4	1LE1501-3AB52-2AA4	200	1490	95,1	1Е2
5	1LE1503-3AB52-2AA4	200	1490	96,0	1Е3

Таблиця 3

Залежність ККД електродвигунів від навантаження [19-21]

M	Тип	Клас	ККД, % при навантаженні, %		
			50 %	75 %	100 %
1	АО103-М4	1Е1	92,1	93,0	92,5
2	МЗВР315MLA4	1Е2	95,3	95,6	95,6
3	МЗВР315MLB4	1Е3	96,4	96,4	96,0
4	1LE501-3AB52-2AA4	1Е2	94,7	95,3	95,1
5	1LE503-3AB52-2AA4	1Е3	96,1	96,3	96,0

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 насоса 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 (систем із змінною витратою). Дослідження проведені в теплових мережах підприємств комунальної теплоенергетики в середньостатистичному вимірі підтверджують такий профіль навантаження мережевих насосних агрегатів.

Електродвигун вмикається у мережу безпосередньо, тобто швидкість двигуна не регулюється за допомогою перетворювача частоти протягом циклу, а витрата насоса Q регулюється за допомогою засувки, тобто має місце дросельне регулювання. Напір води у цьому випадку змінюється відповідно до кривої Q – H насоса, а робоча точка є точкою перетину характеристики насоса та характеристики гідравлічної системи.

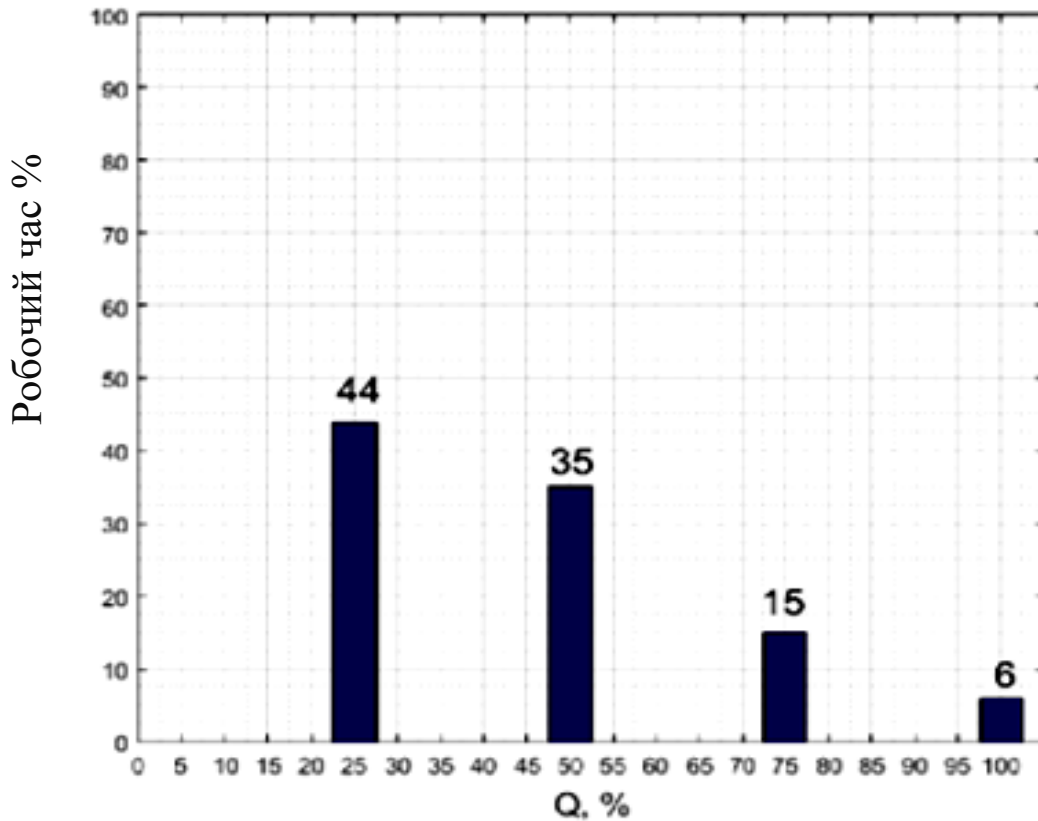


Рис. 2. Часова залежність витрати теплоносія за цикл [9].

На рис. 3 наведено напірну характеристику насоса, (крива 1), згідно даних виробника та гідравлічні характеристики тепломережі, (криві 2-а; 2-б; 2-в; 2-г), що відповідають технологічним режимам роботи мережі централізованого тепlopостачання, згідно досліджень реальної тепломережі.

На рис. 4 показано залежність ККД насоса від подачі теплоносія, згідно даних виробника.

Крива потужності насоса, залежно від витрати, наводиться виробником насоса (рис. 5).

За цією кривою було визначено потужність насоса в 4-х стандартних режимах роботи (25%, 50%, 75%, 100% витрати). Витрата, що відповідає 100%, було визначено за кривою ККД насоса [9] як відповідний максимальному ККД. На підставі відомих паспортних значень ККД електродвигунів (табл. 2) шляхом поліноміальної інтерполяції кривої витрат

$\Sigma P_{\text{втр.дв.м.}}$ кожного електродвигуна було визначено величини ККД для чотирьох режимів роботи насосного агрегату, оскільки, залежність втрат електродвигуна від навантаження добре описується поліномом другого порядку, коефіцієнти якого можна легко отримати за 3-ма точками вихідних згідно ККД електродвигунів.

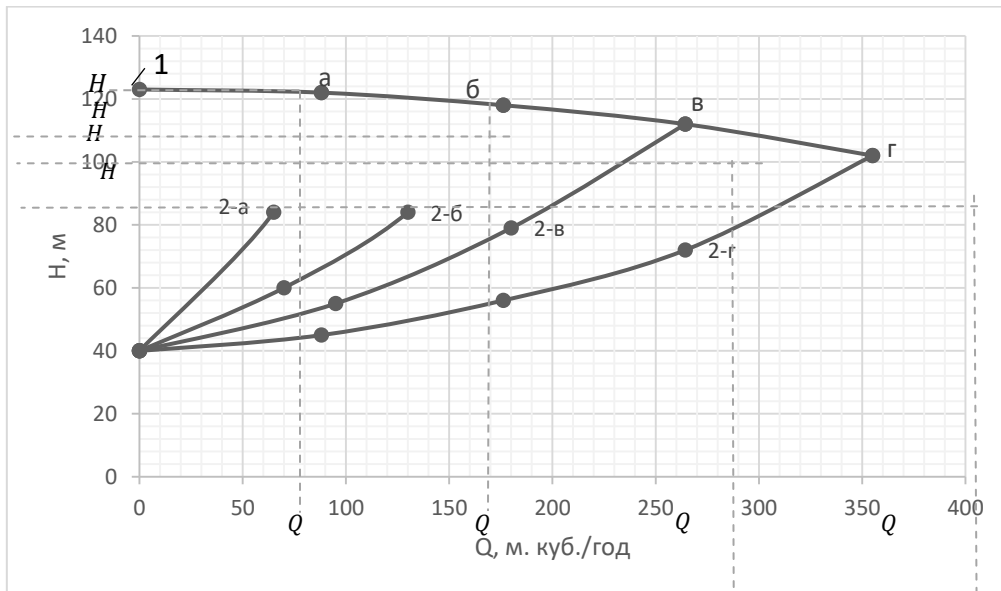


Рис. 3. Напірна характеристика насоса (1) та гідравлічні характеристики мережі системи централізованого тепlopостачання при різних навантаженнях (2) [18].

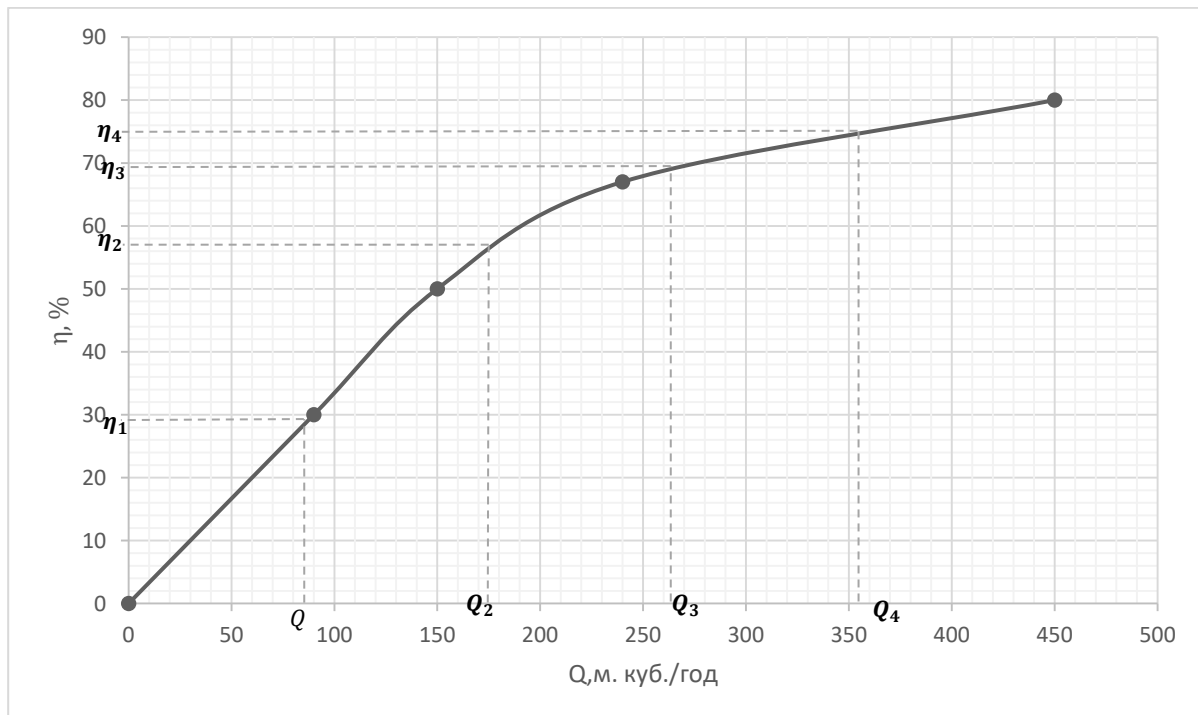


Рис. 4. Залежність ККД насоса від подачі теплоносія [18].

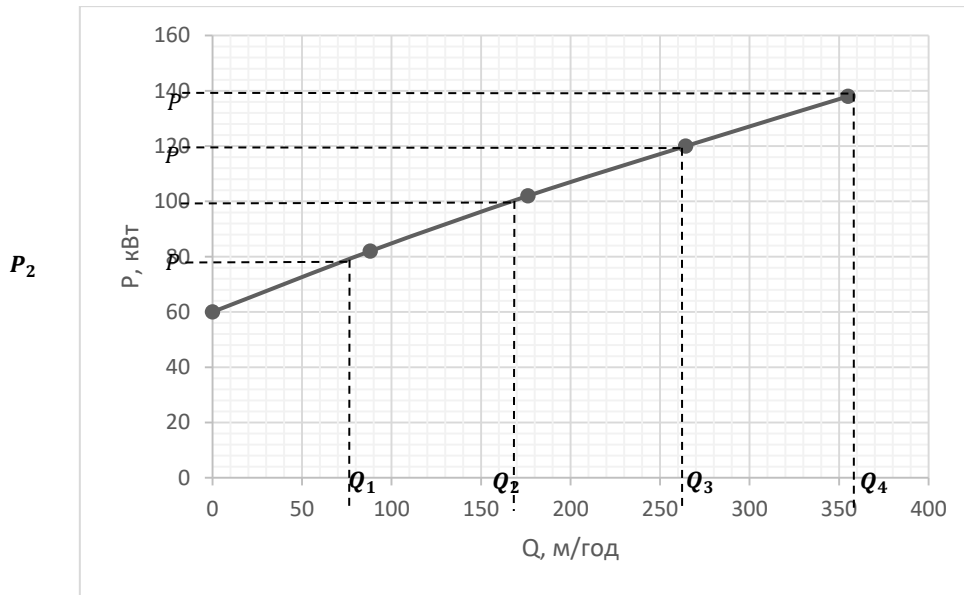


Рис. 5. Залежність потужності насоса від подачі теплоносія [18].

Отримані значення ККД для кожного електродвигуна $\eta_{m.i.m}$ наведені в табл. 3, в якій також зазначені для кожного режиму роботи: витрата, напір, потужність насоса, вихідна потужність електродвигунів у відсотках щодо номінальної.

Таблиця 4

Інтерпольоване значення ККД електродвигунів насосного агрегату

i	1	2	3	4
$Q_i, \%$	25	50	75	100
$Q_i, \text{м}^3/\text{ГОД}$	88,1	176,2	264,3	355
$H_{\text{нас.}i}, \text{м}$	122	118	112	102
$P_{\text{мех.}i}, \text{Вт}$	82	102	120	138
$P_{\text{мех.}i}, \%$	38,7	50,7	61,9	71,5
ККД $\eta_{m.i.m}, \%$				
i	1	2	3	4
АО103-4М	91,1	91,2	91,6	91,2
МЗВР315МLА4	92,5	93,4	94,8	94,4
МЗВР315МLВ4	93,5	94,4	94,8	94,6
1LE501-3AB52-2AA4	92,9	93,6	94,5	94,4
1LE503-3AB52-2AA4	94,3	94,5	94,8	94,5

Активна електрична потужність, що споживається з мережі, в кожному режимі обчислюється згідно з виразом (5)

$$P_{1.i.m} = P_{\text{мех}.i.m} / \eta_{m.i.m}, \quad (5)$$

де $\eta_{m.i.m}$ – ККД m-го електродвигуна в i-му режимі роботи.
Результати розрахунку наведено у табл. 4.

Добове споживання електроенергії кожного електродвигуна (кВт·год) за повний цикл роботи насосного агрегату відповідно до профілю навантаження визначається виразом

$$E_{д.м} = \frac{t_{\Sigma}}{1000} \cdot \sum_{i=1}^4 (P_{1.i.m} \cdot t_i / t_{\Sigma}), \text{ кВт/год}, \quad (6)$$

де t_{Σ} - час циклу (24 год.), t_i - час i-того режиму.

Таблиця 4

Порівняння річного споживання електроенергії електродвигунами насосного агрегату різного класу енергоефективності

№	I	1	2	3	4	$E_{д}$ кВт·год	$E_{р}$ МВт·год
1	АО103-4М	90,01	111,84	131	151,31	2579,3	464,274
2	МЗВР315MLA4	88,64	109,20	126,58	146,18	2519,5	453,510
3	МЗВР315MLB4	87,70	108,05	126,58	145,87	2499,4	449,892
4	1LE501-3AB52-2AA4	88,26	108,97	126,98	146,18	2514,9	452,682
5	1LE503-3AB52-2AA4	86,95	107,93	126,58	146,05	2490,8	448,344

Оскільки опалювальний сезон в більшості міст України в середньому триває 180 діб то при такому режимі роботи насосного агрегату річна величина енергоспоживання може бути розрахована як:

$$E_{р.м} = E_{д.м} \cdot 180, \text{ кВт/год}. \quad (7)$$

Для зіставлення енергоспоживання насосних агрегатів з різними електродвигунами порівнювалося енергоспоживання електродвигунів класу енергоефективності IE2 та IE3 виробництва фірм АВВ та SIEMENS з електродвигуном з найбільшою витратою електроенергії застарілої серії, які проте дотепер експлуатуються в системах централізованого

теплопостачання України і підлягають заміні (електродвигун №1 класу ІЕ1 типу АО-103 4М).

Аналіз річного споживання електроенергії електроприводами насосного агрегату показує, що найбільша економія електроенергії досягається за використання для модернізації електроприводу електродвигуна 1LE-503-3AB52-2AA4

$$\Delta E_{p.m} = E_{p.m} - E_1 \quad (8)$$

Результати розрахунків за формулами (4-8) зведені у табл. 4, а також показані на діаграмі рис. 6.

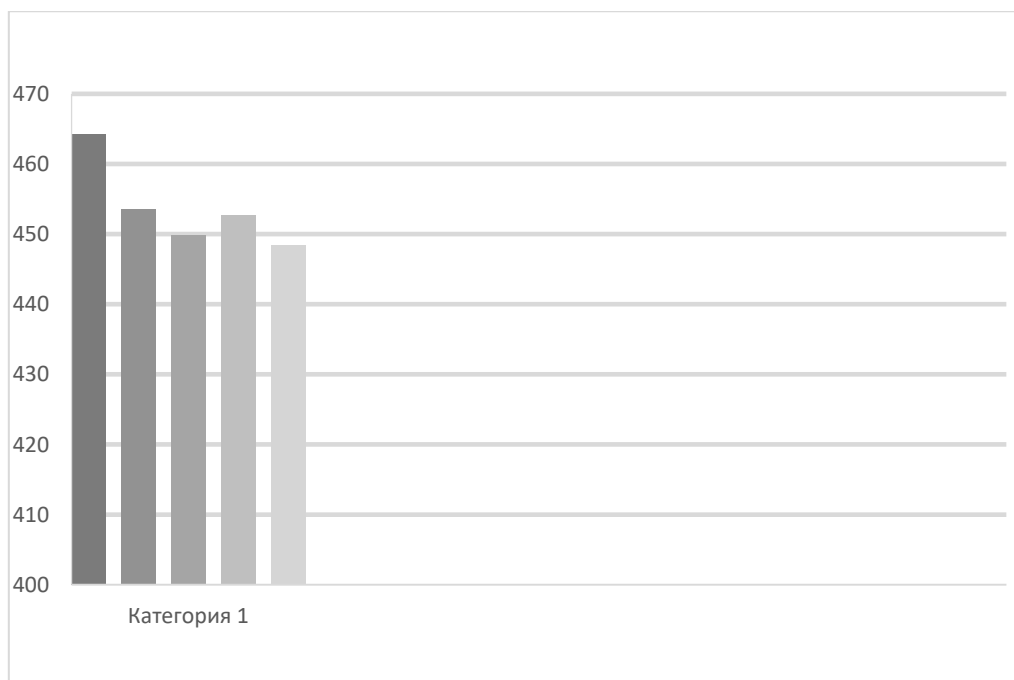


Рис. 6. Річне споживання електроенергії електродвигунами насосного агрегату різного класу енергоефективності.

Висновки. Модернізація електроприводу насосних агрегатів теплових мереж систем централізованого постачання шляхом заміни електродвигунів класу енергоефективності ІЕ1 на класи ІЕ2або ІЕ3 може принести значну економію річного споживання електроенергії. При цьому, різниця в річному споживанні електричної енергії найбільш виражена між електродвигуном третього класу енергоефективності 1LE503-3AB52-2AA4 виробництва компанії SIEMENS та електродвигуном АО103-4М застарілої конструкції. В той же час, різниця в річному споживанні електричної енергії між електродвигунами другого і третього класу енергоефективності виробництва компанії АВВ складає 3708 кВт·год, а виробництва компанії SIEMENS складає 4338 кВт·год. Проте, різниця в річному споживанні електроенергії

між електродвигунами другого і третього класу енергоефективності різних виробників є незначною. Це означає, що вибір між ними має здійснюватись на основі додаткового економічного обґрунтування. Саме у цьому полягає перспектива одного з напрямів подальших досліджень.

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., Lukaszczuk M. Oversizing pump motors – the problems. *World Pumps*. 2005. vol. 2005. no. 466. P. 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. *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. Mutize C., Wang R-J. Performance comparison of an induction machine and line-start PM motor for cooling fan applications». *Proceedings of SAUPEC*. 2013. doi: 10.13140/RG.2.1.2542.1922.
7. Jian Li, Jungtae Song, Yunhyun Cho. High Performance Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor for Pumping System. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2010. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637082.
8. Kahrisangi M. G., Isfahani A. H., Vaez-Zadeh S., Sebdani M. R. Line-start permanent magnet synchronous motors versus induction motors: A comparative study. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*. 2012. P. 2095-2732. doi: 10.1007/s11460-012-0217-8.
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. URL: <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, amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. URL: <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. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/136>
12. Стандарт енергоефективності Мек-60034-30.2008. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/136>
13. Стандарт енергоефективності Мек-60034-30-1.2014csa-390-10. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/136>
14. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/112/4807/>
15. Регламент Комісії (ЄС) № 640/2009 від 22 липня 2009 р. про виконання Директиви 2005/32/ЄС Європейського Парламенту та Ради щодо вимог з екодизайну для електродвигунів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0196731-18#Text>
16. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-2019-%D0%BF#Text>
17. Коренькова Т. В., Сердюк О. О., Ковальчук В. Г. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с. URL: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf
18. Сумська насосна техніка. URL: <https://sumnt.com/>
19. Каталог АВВ Двигатели и генераторы. URL: <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
20. Catalog D 81.1: SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors - December 2022. URL: <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>
21. Електродвигуни серії АО. URL: <https://elteh.com.ua/>

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., Lukaszczyk M. Oversizing pump motors – the problems. *World Pumps*. 2005. vol. 2005. no. 466. P. 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. *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. Mutze C., Wang R-J. Performance comparison of an induction machine and line-start PM motor for cooling fan applications. *Proceedings of SAUPEC*. 2013. doi: 10.13140/RG.2.1.2542.1922.
7. Jian Li, Jungtae Song, Yunhyun Cho. High Performance Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor for Pumping System. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. 2010. doi: 10.1109/ISIE.2010.5637082.
8. Kahrisangi M. G., Isfahani A. H., Vaez-Zadeh S., Sebdani M. R. Line-start permanent magnet synchronous motors versus induction motors: A comparative study. *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering*. 2012. P. 2095-2732. doi: 10.1007/s11460-012-0217-8.
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 Available at: <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, amended by Commission Regulation (EU) No 4/2014 of January 6, 2014. Available at: <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. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/136>
12. Standart enerhoeffektyvnosti Mek-60034-30.2008. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/136>
13. Standart enerhoeffektyvnosti Mek-60034-30-1.2014csa-390-10. Available at: <https://webstore.iec.ch/publication/136>
14. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. Available at: <https://standards.ieee.org/ieee/112/4807/>
15. Rehlament Komisii (YeS) № 640/2009 vid 22 lypnia 2009 r. pro vykonannia Dyrektyvy 2005/32/YeS Yevropeiskoho Parlamentu ta Rady shchodo vymoh z ekodyzainu dlia elektrodvyhuniv. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0196731-18#Text>
16. Pro zatverdzhennia Tekhnichnogo rehlamentu shchodo vymoh do ekodyzainu dlia elektrodvyhuniv. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/157-2019-%D0%BF#Text>
17. Korenkova T. V., Serdiuk O. O., Kovalchuk V. H. Rezhymy roboty nasosnykh ta ventyliatornykh ustanovok iz avtomatyzovanykh elektropryvodom: navch. posibnyk. – Kremenchuk: Vydavnytstvo PP Shcherbatykh O. V., 2013. – 200 s. Available at: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf
18. Sumska nasosna tekhnika. Available at: <https://sumnt.com/>
19. Kataloh AVV Dvyhately y heneratori. Available at: <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
20. Catalog D 81.1: SIMOTICS GP, SD, XP, DP Low-Voltage Motors - December 2022. Available at: <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>
21. Elektrodvyhuny serii AO. Available at: <https://elteh.com.ua/>

Надійшла до редакції 11.04.2023 р.