

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

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

Горлачук Микола Анатолійович, к.е.н., доц., доцент. Тел. (+38)0672686628; E-mail: m.horlachuk@wunu.edu.ua

Завитій Ольга Петрівна, к.е.н., доц., доцент. Тел. (+38)0974366040; E-mail: o.zavytii@wunu.edu.ua

Головко Роман Володимирович, студент групи ЕЛЕА-2. Тел. (+38)0686739067; E-mail: roman15holovko@gmail.com

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

ЧАСТОТНЕ РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З КОРОТКОЗАМКНЕНИМ РОТОРОМ

Анотація. Визначено кількісні та якісні параметри частотного регулювання електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання. Обґрунтовано необхідність та можливість застосування частотно-регульованого електроприводу насосних агрегатів в мережах централізованого теплопостачання, в режимі їх роботи кількісно-якісного регулювання подачі теплоносія. Розрахунок параметрів частотного регулювання проводився на основі технічних даних, що стосуються режиму роботи, де витрати теплоносія змінюється відповідно до гідравлічного навантаження типового для HVAC додатків визначених Регламентом Євросоюзу, а також технічних даних насоса, частотного перетворювача і електродвигунів, що надаються виробниками. Визначення параметрів стосується роботи насосних агрегатів в типовому робочому циклі характерному для мереж централізованого теплопостачання, що передбачає роботу з зниженим навантаженням протягом тривалого часу. Отримано результати, що стосуються діапазону швидкості обертання електроприводу, його потужності, обертового моменту, подачі теплоносія та гідравлічного напору насоса в реальній типовій мережі централізованого теплопостачання. Практичне значення отриманих результатів, полягає у тому, що вони можуть бути використані для модернізації електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання, які дотепер експлуатуються з нерегульованими електроприводами на базі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором та дросельним регулювання подачі теплоносія.

Ключові слова: мережеві насоси, частотне регулювання, параметри частотного регулювання, частотний перетворювач, асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором.

Fedirko Mykhailo M., PhD in Economics, Associate Professor. Tel. (+38) 0953318168; E-mail: m.fedirko@wunu.edu.ua

Brych Vasyl Y., Doctor of Economics, Professor, Director of the Research Institute of International Relations. Tel. (+38) 0677435080; E-mail: v.brych@wunu.edu.ua

Horlachuk Mykola A., PhD in Economics, Associate Professor. Tel. (+38)0672686628; E-mail: m.horlachuk@wunu.edu.ua

Zavytii Olha P., PhD in Economics, Associate Professor. Tel. (+38) 0974366040; E-mail: o.zavytii@wunu.edu.ua

Golovko Roman V., student of the group ELEA-22. Tel. (+38) 0686739067; E-mail: roman15holovko@gmail.com
Western Ukrainian National University, 11 Lvivska St., Ternopil, Ukraine, 46009

FREQUENCY REGULATION OF THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS OF THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY NETWORK BASED ON ASYNCHRONOUS MOTORS WITH A SHORT-CIRCUITED ROTOR

Abstract. The quantitative and qualitative parameters of the frequency regulation of the electric drive of the pumping units of the centralized heat supply network were determined. The necessity and possibility of using the frequency-regulated electric drive of pumping units in the networks of centralized heat supply, in the mode of their operation of quantitative and qualitative regulation of the coolant supply, is well-founded. The frequency control parameters were calculated on the basis of technical data related to the operating mode, where the flow rate of the coolant changes according to the hydraulic load typical for HVAC applications defined by the European Union Regulation, as well as the technical data of the pump, frequency converter and electric motors provided by the manufacturers. The definition of parameters concerns the operation of pumping units in a typical operating cycle characteristic of district heating networks, which involves operation with a reduced load for a long time. The results

were obtained that correspond to the range of the speed of rotation of the electric drive, its power, torque, coolant supply and hydraulic pressure of the pump in a real typical network of centralized heat supply. The practical significance of the obtained results is that they can be used for the modernization of the electric drive of pumping units of the centralized heat supply network, which until now are operated with non-regulated electric drives based on an asynchronous motor with a short-circuited rotor and throttle regulation of the coolant supply.

Keywords: network pumps, frequency regulation, parameters of frequency regulation, frequency converter, asynchronous electric motors with a short-circuited rotor.

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. 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 енергоефективності та якості надання послуг з теплопостачання.

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 частотного регулювання обертів асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що дозволяє змінювати продуктивність насоса та його напір в мережі.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Питання енергоефективності електроприводу насосних агрегатів, в основному розглядаються в працях зарубіжних вчених, і вони стосуються здебільшого 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 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 електроенергії, особливо в умовах малих навантажень, питанням же роботи насосних агрегатів у складі систем централізованого

теплопостачання не приділяється належної уваги, не тільки в працях вітчизняних, але і зарубіжних науковців.

У дослідженні розглядаються методичні підходи до визначення параметрів частотного регулювання для приводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, як складової їх модернізації. У зв'язку з цим висувається робоча гіпотеза, що параметри частотного регулювання залежать від технологічного режиму роботи мережі централізованого теплопостачання.

Метою роботи є визначення кількісних та якісних параметрів частотного регулювання електроприводу насосних агрегатів реальної типової системи централізованого теплопостачання та обґрунтування заходів щодо підвищення її енергоефективності та якості надання послуг з теплопостачання.

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.[6] Тому підвищення енергетичної ефективності насосних агрегатів загалом, та їх електроприводу, зокрема у системі централізованого теплопостачання, значною мірою залежить від класу енергоефективності електродвигунів та відповідності режимів роботи електроприводу технологічним вимогам і є важливим практичним завданням.

Мінімальний рівень енергетичної ефективності електродвигунів визначено у Регламенті ЄС щодо екодизайну електродвигунів, [7] Класи енергоефективності електродвигунів зазначено у відповідних документах. [8] Згідно Регламенту Євросоюзу [7] 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 [7,8] ґрунтується лише на ККД у номінальному режимі роботи, тобто при номінальній потужності на валу та швидкості обертання, але не враховує ККД електродвигунів при частковому навантаженні та зниженій швидкості обертання, яке характерне для електродвигунів у складі насосних агрегатів.

Розглянемо характеристики насосного агрегату та частотно-регульованого електроприводу. На рис. 1 зображено склад запропонованого нами насосного агрегату тепломережі системи централізованого теплопостачання. До складу насосного агрегату входить трифазний асинхронний електродвигун, що живиться через частотний перетворювач від електричної мережі, який приводить в рух відцентровий насос, що працює на гідравлічну систему тепломережі.

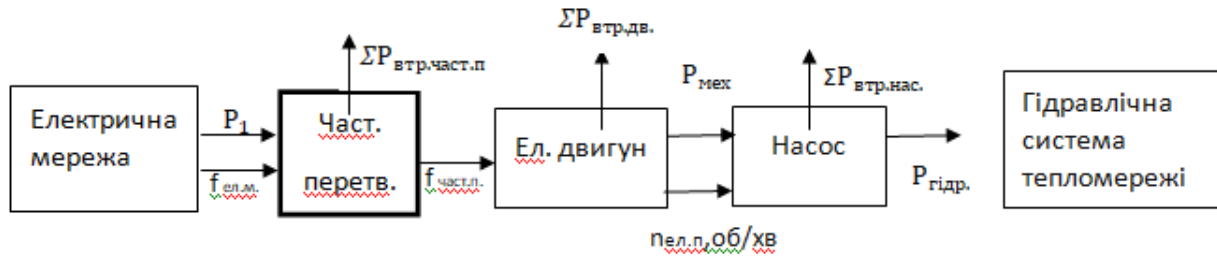


Рис.1. Склад частотно-регульованого насосного агрегату мережі централізованого тепlopостачання.

Споживана приводом активна потужність P_1 перетворюється електродвигуном в механічну потужність $P_{\text{мех}}$. Ця потужність $P_{\text{мех}}$ менша за споживана потужність P_1 на величину втрат в електродвигуні та частотному перетворювачі[9,6]:

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

де $\Sigma P_{\text{втр.дв.}}$ – сумарні втрати електродвигуна; $\Sigma P_{\text{втр.част.п.}}$ – сумарні втрати частотного перетворювача.

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 [9]:

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

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, ККД –коефіцієнт корисної дії насоса.

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 [9]:

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

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

Отже для визначення споживання електроенергії електроприводом насосного агрегату необхідно розрахувати такі параметри, як подачу теплоносія та напір в мережі централізованого тепlopостачання за умови, що частота обертання насоса регулюється. Зміна частоти робочого колеса насоса призводить до зміни всіх його характеристик. Перерахунок характеристик насоса на іншу частоту обертання здійснюється за допомогою формул приведення, зокрема наведених у джерелі [10]. Проте формули приведення справедливі для турбулентного руху рідини в насосі, який при деякому критичному зниженні частоти обертання переходить у ламінарний, через що порушується гідравлічна подібність характеристик насоса, тому використання формул приведення для перерахунку характеристик відцентрових насосів при низьких обертах робочого колеса недопустимо. Порушення гідравлічної подібності режимів роботи починається при зниженні частоти обертання робочого колеса, приблизно, в діапазоні:

$$n_{\text{гран.мін.}} = (0,1 \div 0,15)n_{\text{ном}} [10]; \quad (5)$$

При використанні формул приведення слід мати на увазі, що вони не придатні для визначення робочих параметрів відцентрових насосів при роботі з протитиском, коли подача залежить не тільки від частоти обертання, але також від співвідношення H_p/H_f , де: H_f – фіктивний напір при нульовій подачі; H_p – протитиск в системі подачі теплоносія. Основні параметри відцентрованих насосів, Q , H , N , M розраховуються на основі графічних залежностей цих параметрів від частоти обертання і співвідношення H_p/H_f , такі залежності перевірені експериментально, і наведені в літературі [10].

Як об'єкт дослідження в даній роботі обрано реальну найбільш типову теплову мережу централізованої системи тепlopостачання підприємства комунальної теплоенергетики, де має місце кількісно-якісний метод регулювання температурного режиму. При цьому подача теплоносія регулюється за допомогою засувки. В даному дослідженні пропонується подачу теплоносія регулювати за допомогою зміни числа обертів насоса, тобто частотно-регульованого електроприводу на базі трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором.

Обстеження реальної теплової мережі показали, що фактичні витрати та подача теплоносія складає $1063 \text{ м}^3/\text{год.}$, максимальна подача (витрата) теплоносія $1200 \text{ м}^3/\text{год.}$, 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, а технічні дані частотного перетворювача наведені в табл.2.

Таблиця 1
Паспортні характеристики
насоса тепломережі [11]

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

Таблиця 2
Паспортні характеристики
частотного перетворювача [12]

Параметр	Значення
Тип	АСН580-07-363А-4
P , кВт	200
Частота, Гц	Від 0 до 500
Керування	Векторне
U, В	380
ККД, %	0,98
t , °С	Від 0 до +50
I, А	363

Для приводу насоса, в даний час використовується електродвигун АО-103-4М, технічні характеристики якого наведені в табл. 3.

Таблиця 3
Технічні характеристики електродвигунів приводу насосного агрегату
[13,14,15]

№	Тип	P , кВт	n , об/хв	ККД	Клас енергоефективності
1	АО103-4М	200	1450	92,5	1Е1
2	МЗВР315МLА4	200	1486	95,6	1Е2
3	1LE1503-3AB52-2AA4	200	1490	96,0	1Е3

Модернізація електроприводу передбачає заміну цього двигуна застарілої конструкції класу енергоефективності ІЕ1 згідно вимог регламенту Євросоюзу на електродвигун аналогічної потужності та обертів класу енергоефективності ІЕ2 та ІЕ3, з частотним перетворювачем АСН580-07-363А-4. Розрахунок проводиться для асинхронних двигунів МЗВР315МLА4, 1LE1503-3AB52-2AA4 та пропонованого частотно-регульованого електроприводу (табл.3).

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 [6] і поділений на 4 режими.

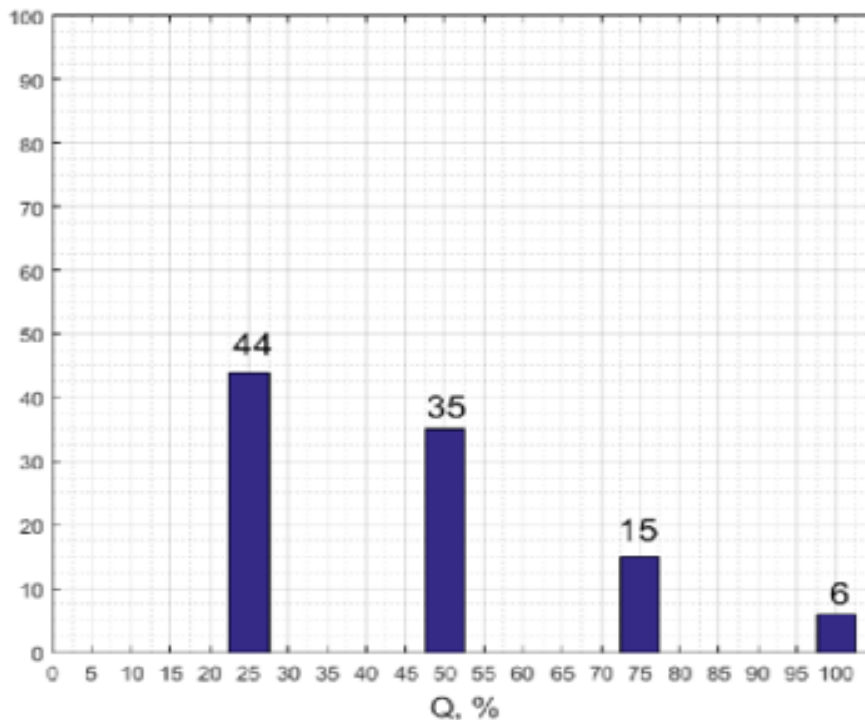


Рис. 2. Часова залежність витрати теплоносія за цикл [6].

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

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 теплопостачання, згідно досліджень реальної тепломережі при різних навантаженнях.

У першому варіанті дослідження до модернізації, електродвигун вмикається у мережу безпосередньо, тобто швидкість двигуна не регулюється за допомогою перетворювача частоти протягом циклу, а подача теплоносія насосом 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.

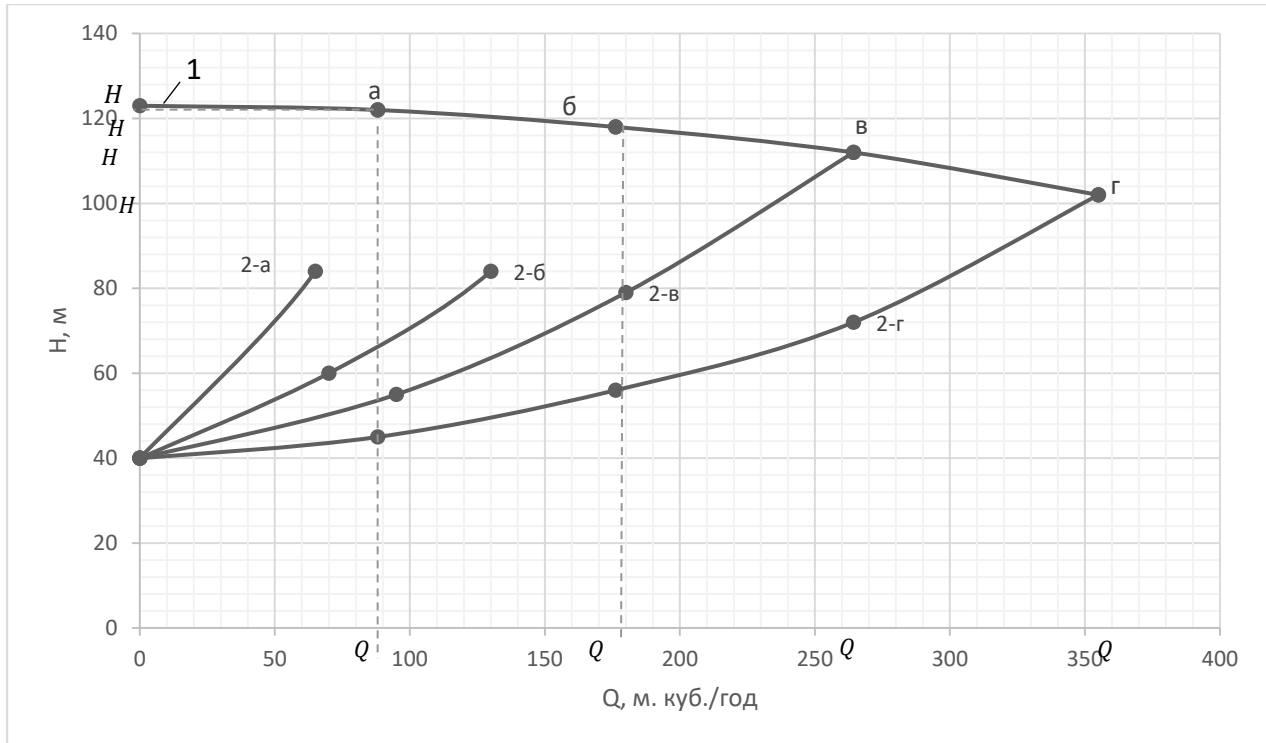


Рис. 3. Напірна характеристика насоса (1) та гідравлічні характеристики мережі системи централізованого теплопостачання при різних навантаженнях (2) [11].

Результати розрахунку параметрів частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання наведено в табл. 4.

Таблиця 4
Параметри частотно-регульованого електроприводу мережевого насоса.

$Q/Q_{\text{НОМ}}$	Q , м.куб./ГОД	n , об/хв	H , м	N , кВт	M , Н*м
$Q_1/Q_{\text{НОМ}} = 0,22$	$Q_1 = 88$	$n_1 = n_{\text{НОМ}} * 0,22 = 320$	$H_1 = H_{\text{НОМ}} * 0,22 = 10$	$N_1 = N_{\text{НОМ}} * 0,22 = 10$	$M_1 = M_{\text{НОМ}} * 0,22 = 65$
$Q_2/Q_{\text{НОМ}} = 0,44$	$Q_2 = 176$	$n_2 = n_{\text{НОМ}} * 0,44 = 638$	$H_2 = H_{\text{НОМ}} * 0,44 = 23$	$N_2 = N_{\text{НОМ}} * 0,44 = 20$	$M_2 = M_{\text{НОМ}} * 0,44 = 273$
$Q_3/Q_{\text{НОМ}} = 0,66$	$Q_3 = 264$	$n_3 = n_{\text{НОМ}} * 0,66 = 957$	$H_3 = H_{\text{НОМ}} * 0,66 = 60$	$N_3 = N_{\text{НОМ}} * 0,66 = 72$	$M_3 = M_{\text{НОМ}} * 0,66 = 650$
$Q_4/Q_{\text{НОМ}} = 0,88$	$Q_4 = 355$	$n_4 = n_{\text{НОМ}} * 0,88 = 1286$	$H_4 = H_{\text{НОМ}} * 0,88 = 92$	$N_4 = N_{\text{НОМ}} * 0,88 = 160$	$M_4 = M_{\text{НОМ}} * 0,88 = 1040$

Подача теплоносія в системі централізованого теплопостачання змінюється в межах від 88 м.куб./год до 355 м.куб./год, що відповідає типовому циклу роботи мережі теплопостачання, обраної нами для

дослідження. Такому діапазону зміни подачі теплоносія має відповідати діапазон зміни частоти обертання n від 320 об/хв до 1286 об/хв. Потужність споживана насосом буде змінюватися в діапазоні від 10 до 160 кВт, а момент необхідний для приводу насоса буде змінюватися в діапазоні від 60 до 1040 Н*м. За даними табл. 4 побудований графік робочих характеристик насоса при його частотному регулюванні.

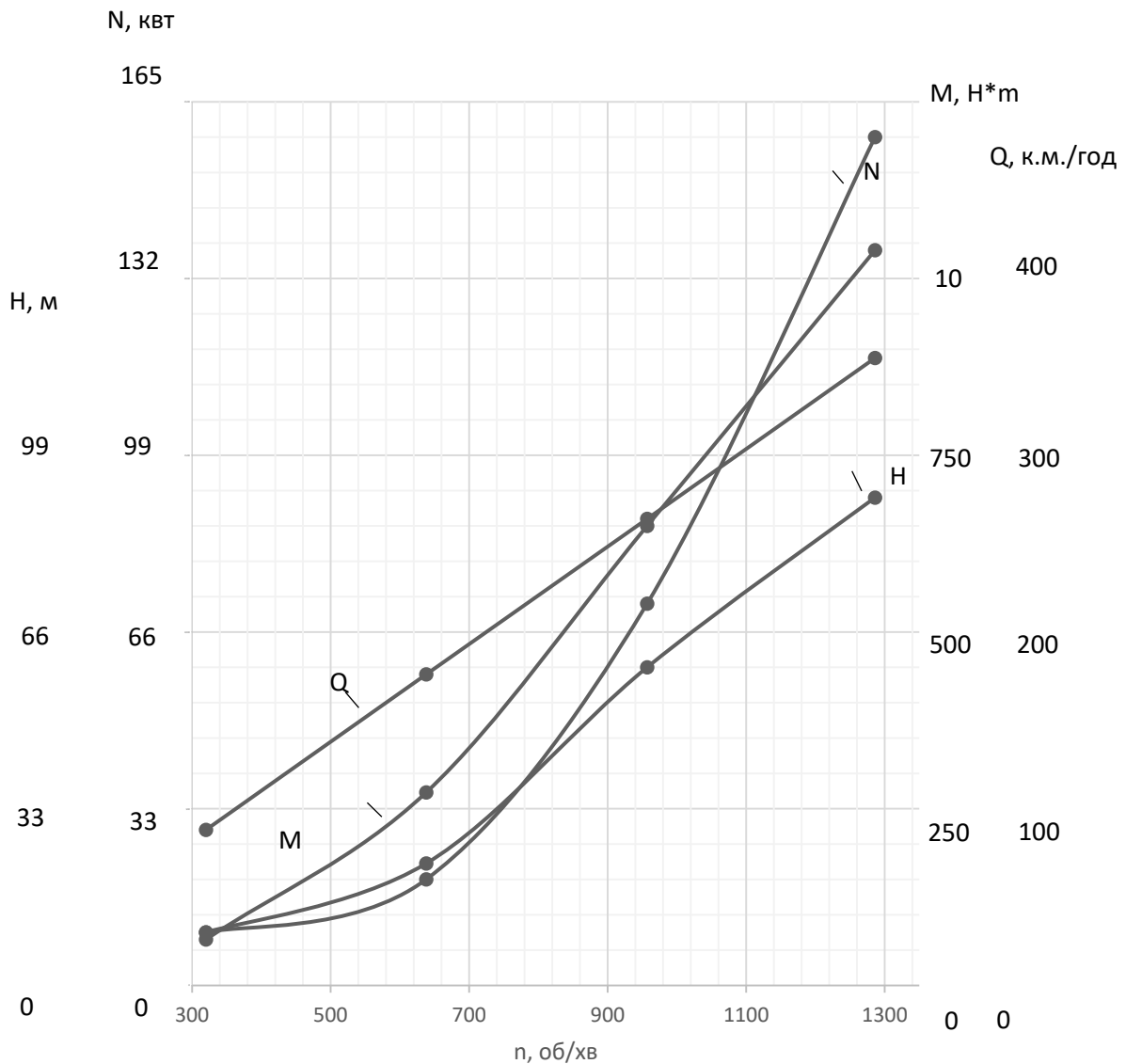


Рис. 4. Робочі характеристики насоса при його частотному регулюванні.

Висновок. Визначення параметрів частотного регулювання електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання є необхідною передумовою його модернізації з метою підвищення енергоефективності та якості надання послуг з теплопостачання.

За отриманими результатами визначення основних параметрів частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату мають бути обрані його складові елементи, а саме: за розрахунковою витратою теплоносія в мережі, має бути визначена продуктивність насоса та його напірна характеристика. За споживаною потужністю, насос та потужність електродвигуна, за обертовим моментом – швидкість обертання двигуна. За потужністю електродвигуна має бути обраний частотний перетворювач, а за діапазоном регулювання обертів електроприводу – зміна частоти частотного перетворювача. Порівняння характеристик насоса (табл. 1), частотного перетворювача (табл. 2) та електродвигунів (табл. 3) з розрахованими параметрами, які наведені в (табл. 4) показує, що складові елементи мережевого насосного агрегату у нашому дослідженні обрані вірно.

Список використаної літератури:

1. Gevorkov L. Simulation and Experimental Study on Energy Management of Circulating Centrifugal Pumping Plants with Variable Speed Drives. PhD Thesys, Tallinn University of Technology, 2017.
2. Shuvalova J. Optimal Approximation of Input-Output Characteristics of Power Units and Plants. PhD Thesys, 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. *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. 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>
7. 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. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
8. 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>
9. 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
10. Лезнов Б. С. *Л 41 Частотно-регулируемый электропривод насосных установок*. М. Машиностроение, 2013. 176 с.
11. Сумська насосна техніка. URL: <https://sumnt.com/>
12. Каталог АВВ Приводы АВВ для систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха. URL: <https://global.abb.com/group/en>
13. Каталог АВВ Двигатели и генераторы. URL: <https://new.abb.com/motors-generators/ru>

14. 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>

15. 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., 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, pp. 1144. doi: 10.3390/en12061144.
6. 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>
7. 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. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0004>
8. 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>
9. 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
10. Leznov B. S. *L 41 Chastotno-rehulyruemii elektropryvod nasosnykh ustanovok*. M. Mashynostroenye, 2013. 176 s.
11. Sumska nasosna tekhnika. Available at: <https://sumnt.com/>
12. Kataloh AVV Pryvodi ABB dlia system otoplenyia, ventyliatsyy y kondytsyonyrovanyia vozdukh. Available at: <https://global.abb/group/en>
13. Kataloh AVV Dvyhately y heneratori. Available at: <https://new.abb.com/motors-generators/ru>
14. 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>
15. Elektrodvyhuny serii АО. Available at: <https://elteh.com.ua/>

Надійшла до редакції 17.06.2023 р.