

**ФЕДІРКО МИХАЙЛО**Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-8244-3478>  
e-mail: [m.fedirko@wunu.edu.ua](mailto:m.fedirko@wunu.edu.ua)**ЗАВИТІЙ ОЛЬГА**Західноукраїнський національний університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7439-6923>  
e-mail: [o.zavytii@wunu.edu.ua](mailto:o.zavytii@wunu.edu.ua)**ГОЛОВКО РОМАН**Західноукраїнський національний університет  
e-mail: [roman15holovko@gmail.com](mailto:roman15holovko@gmail.com)**ЧОРНИЙ МАТВІЙ**Західноукраїнський національний університет  
e-mail: [chorniimatvii90@gmail.com](mailto:chorniimatvii90@gmail.com)

## ПІДХОДИ ДО ВИБОРУ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ В СТРУКТУРІ ЧАСТОТНО-РЕГУЛЬОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ МЕРЕЖЕВИХ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Обґрунтовано необхідність вибору перетворювача частоти в структурі частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання з урахуванням вимог, які висуває технологічний режим його роботи та економічної ефективності. Визначено аналітичні залежності, що стосуються параметрів частотного перетворювача. Розрахунок параметрів вибору частотного перетворювача проводився на основі технічних даних, що стосуються режиму роботи насосного агрегату, де витрата теплоносія змінюється відповідно до гідравлічного навантаження типового для HVAC додатків визначених Регламентом Євросоюзу, а також технічних даних насоса, частотного перетворювача і електродвигуна, що надаються виробниками. Визначення параметрів стосується роботи насосних агрегатів в типовому робочому циклі характерному для мереж централізованого теплопостачання, що передбачає роботу з зниженням навантаження протягом тривалого часу. Отримано результати, що стосуються діапазону швидкості обертання електроприводу, його потужності, обертового моменту. Отримані результати дають підставу для застосування в структурі електроприводу перетворювачів частоти із скалярним методом керування. Із застосуванням методу чистої приведеної вартості визначено економічну ефективність застосування перетворювача частоти з скалярним методом керування, порівняно з варіантом застосування в структурі електроприводу перетворювача частоти з векторним методом керування. Практичне значення отриманих результатів, полягає у тому, що вони дають підстави для об'єктивного вибору типу перетворювача частоти при проектуванні та комплектації систем електроприводу мережеских насосних агрегатів.

**Ключові слова:** перетворювач частоти, скалярний та векторний метод керування, структура частотно-регульованого електроприводу, насосні агрегати, мережі теплопостачання, економічна ефективність.

FEDIRKO MYKHAILO, ZAVYTII OLHA, GOLOVKO ROMAN, CHORNYI MATVII  
Western Ukrainian National University

## APPROACHES TO CHOOSING A FREQUENCY CONVERTER IN THE STRUCTURE OF FREQUENCY- REGULATED ELECTRICAL DRIVE OF NETWORK PUMP UNITS OF CENTRALIZED HEAT SUPPLY SYSTEMS

The necessity of choosing a frequency converter in the structure of the frequency-regulated electric drive of the pumping unit of the centralized heat supply network is substantiated, taking into account the requirements set forth by the technological mode of its operation and economic efficiency. Analytical dependencies related to the parameters of the frequency converter have been determined. The calculation of the frequency control selection parameters was carried out on the basis of technical data related to the operating mode, where the consumption 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 related to the range of rotation speed of the electric drive, its power, and torque were obtained. The obtained results provide a basis for the use of frequency converters with a scalar control method in the structure of the electric drive. Using the net present value method, the economic efficiency of using a frequency converter with a scalar control method was determined, compared to the option of using a frequency converter with a vector control method in the structure of an electric drive. The practical significance of the obtained results is that they provide grounds for an objective choice of the type of frequency converter when designing and equipping electric drive systems of network pumping units.

**Keywords:** frequency converter, scalar and vector control method, structure of frequency-regulated electric drive, pump units, heat supply networks, economic efficiency.

### Постановка проблеми у загальному вигляді та

### її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями.

На сучасному етапі в електроприводі технологічних установок, що мають місце в різних галузях народного господарства, в тому числі в електроприводі мережеских насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання, все ширше застосовуються частотно-регульовані електроприводи на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Застосування такого електроприводу дозволяє значно

підвищити техніко-економічні та соціальні аспекти надання послуг з централізованого теплопостачання. Це проявляється у значному зниженні рівня споживання паливно-енергетичних ресурсів, і далі трансформується у зниження рівня викидів вуглекислого газу в атмосферу, покращенні якості надання послуг фізичним та юридичним особам.

Електроприводи різних технологічних механізмів висувають широкий спектр вимог, щодо діапазону регулювання швидкості та параметрів механічної характеристики. Ці вимоги можуть задовольняти системи частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором. Важлива роль у структурі таких електроприводів належить перетворювачу частоти. На сучасному етапі на ринку силової перетворювальної техніки виробниками пропонується багато видів перетворювачів частоти. Однією з основних відмінностей і важливим фактором, що визначає функціональні властивості перетворювача частоти є метод керування: скалярний чи векторний. Кожен з цих методів керування має свої переваги та недоліки, і суттєво впливає на техніко-економічні показники перетворювача частоти, на його ринкову вартість, а отже на техніко-економічні показники електроприводу загалом.

Що стосується мережевих насосних агрегатів то вони не висувають високих вимог до широкого діапазону регулювання швидкості чи формування механічної характеристики. Аналіз структури реальних систем електроприводу мережевих насосних агрегатів підприємств комунальної теплоенергетики України показує, що проектними організаціями часто, на наш погляд, не обгрунтовано застосовуються перетворювачі частоти з векторним управлінням, що значно завищує вартість електроприводу, і в умовах недостатності інвестиційних ресурсів підприємств комунальної теплоенергетики не дозволяє проводити їх масштабну реконструкцію. Більше того, такий підхід до формування структури частотно-регульованого електроприводу суперечить вимогам державного стандарту України, що стосується електроприводів. З огляду на вище наведене, важливим науковим та практичним завданням є обгрунтування та розробка підходів до вибору перетворювача частоти в структурі частотно-регульованого асинхронного електроприводу мережевих насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Питання застосування частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, висвітлюються в багатьох, як вітчизняних, так і зарубіжних публікаціях. Вони стосуються здебільшого роботи частотно-регульованих електроприводів технологічних механізмів загальнопромислового призначення [1, 2]. Що відноситься до роботи мережевих насосних агрегатів, то ця проблема досліджується в системах водопостачання, чи магістральних насосних агрегатів для перекачування нафтопродуктів, хімічних речовин тощо [2, 3].

В той же час, технологічні режими і параметри роботи мережевих насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання суттєво відрізняються від таких, що мають місце у названих вище системах, як по діапазону регулювання так і за вимогами формування механічних характеристик. Публікації, що стосуються результатів досліджень застосування частотно-регульованого електроприводу мережевих насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, почали з'являтися лише останнім часом. Так, особливості роботи електроприводів систем централізованого теплопостачання висвітлено, зокрема у роботі [4]. Окремі питання синтезу структури електроприводу насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання, і зокрема, їх частотного регулювання, наведено в роботі [5]. Вплив термодинамічних параметрів, на режими роботи електроприводу насосних агрегатів та необхідності його модернізації з метою підвищення їх енергоефективності, розглянуто в роботі [6].

Вище наведене дозволяє зробити висновок, що науковому та практичному вирішенню проблеми формування структури частотно-регульованого електроприводу мережевих насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором, в тому числі вибору перетворювача частоти не приділяється належної уваги.

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття**

Аналіз функцій і місця частотних перетворювачів в структурі частотно-регульованого електроприводу на базі асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, а також практики проектування та комплектування реальних електроприводів мережевих насосних агрегатів в системах централізованого теплопостачання показує, що в підходах до їх вибору має місце спрощений, та навіть, на нашу думку, комерційний підхід, котрий проявляється у бажанні проектними організаціями та виробниками застосовувати у структурі більш дорогі складові, що значно погіршує економічні показники роботи електроприводів. Тому проблема об'єктивного обгрунтування структури електроприводу, і зокрема, вибору перетворювача частоти у структурі електроприводу мережевих насосних агрегатів є важливим науковим та практичним завданням. Саме вирішення цієї проблеми розглядається у даній статті.

#### **Формулювання цілей статті**

У процесі дослідження необхідно досягнути наступні цілі:

1) виходячи з технологічних вимог та режимів роботи систем централізованого теплопостачання обгрунтувати параметри, яким мають відповідати перетворювачі частоти, як структурні елементи частотно-регульованого електроприводу;

2) визначити вплив типу та методу керування перетворювача частоти, на техніко-економічні показники роботи частотно-регульованого електроприводу мережевих насосних агрегатів систем централізованого тепlopостачання

Метою роботи є обґрунтувати підходи до вибору перетворювача частоти в структурі електроприводу мережевих насосних агрегатів систем централізованого тепlopостачання для покращення їх техніко-економічних показників.

Для досягнення поставлених цілей необхідно:

- 1) провести аналіз літературних джерел, присвячених висвітленню цієї проблеми;
- 2) отримати аналітичні вирази для параметрів вибору та сформулювати критерії вибору перетворювачів частоти;
- 3) зробити висновки з проведеного дослідження та визначити перспективи подальших досліджень.

**Виклад основного матеріалу**

До особливостей роботи електроприводів насосних агрегатів систем централізованого тепlopостачання, слід віднести те, що обладнання, якими вони оснащуються зазвичай має достатньо великий запас по потужності. Тому в трубопровідній мережі виникає надлишок тиску, а насосні агрегати працюють з невисокими значеннями коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності. Таким чином, для роботи при номінальних значеннях тиску, продуктивність насосних агрегатів потрібно регулювати. Існують різні способи зміни продуктивності мережевих насосних агрегатів, що працюють паралельно. Найбільш поширеним способом регулювання в даний час є дросельне регулювання, яке призводить до зниження рівня енергоефективності електроприводу, технологічних та механічних порушень в системі тепlopостачання. Проте, останнім часом все більше застосовуються системи регульованого електроприводу. Застосування регульованого електроприводу, крім підвищення плавності регулювання, дає можливість підвищити техніко-економічні показники систем централізованого тепlopостачання.

На рис. 1 схематично наведено структуру електроприводу розроблену нами у роботі [5] і запропоновану як об'єкт дослідження у даній статті. Необхідність такого рішення обумовлюється тим, що у цьому об'єкті відображається реальна тепла мережа. В той же час предмет дослідження в роботах [4, 5] відрізняється від предмета дослідження даної роботи, що дає можливість розглянути проблему функціонування мережі централізованого тепlopостачання різносторонньо.

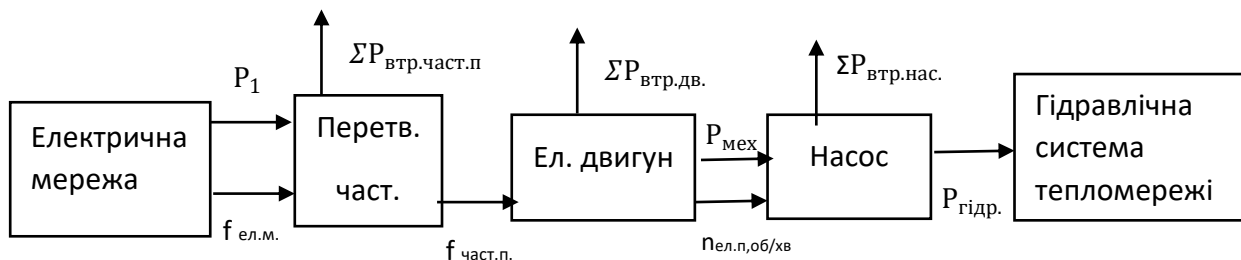


Рис. 1. Частотно-регульований насосний агрегат мережі централізованого тепlopостачання

Споживана приводом активна потужність  $P_1$  перетворюється електродвигуном в механічну потужність  $P_{мех}$ . Ця потужність  $P_{мех}$  визначається формулами наведеними у джерелах [5, 7, 8] менша за потужність  $P_1$  на величину втрат в електродвигуні та перетворювачі частоти:

$$P_{мех} = P_1 - \Sigma P_{втр.дв} - \Sigma P_{втр.част.п} \tag{1}$$

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

Потужність електродвигуна  $P_{мех}$  передається на насос і, отже, дорівнює вхідній механічній потужності насоса. У насосі  $P_{мех}$  перетворюється на гідравлічну потужність  $P_{гидр.}$ , яка є різницею між  $P_{мех}$  та  $\Sigma P_{втр.нас}$  в насосі:

$$P_{гидр} = P_{мех} - \Sigma P_{втр.нас.} \tag{2}$$

Необхідна для руху рідини потужність насоса може бути визначена також за формулою

$$P_{гидр} = \frac{P_{мех}}{ККД_{нас}}, \tag{3}$$

де  $P_{мех}$  – механічна потужність насоса, ККД – коефіцієнт корисної дії насоса.

Ця потужність визначається продуктивністю  $Q$  та напором насоса  $H_{нас}$ . Напір насоса залежить від його продуктивності відповідно до напірної 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  $H$  [5],[9]:

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

де  $\rho$  – щільність рідини,  $g$  – прискорення вільного падіння.

Отже для визначення критеріїв вибору частотного перетворювача та методу його керування, необхідно розрахувати такі параметри, як подачу теплоносія та напір в мережі централізованого

теплопостачання 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].

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2, (H_1/H_2)^2 = Q_1/Q_2, N_1/N_2 = (n_1/n_2)^3 [5]; \quad (5)$$

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:  $n_{\text{гран.мін.}} = (0,1 \div 0,15)n_{\text{ном}}$  [5],[10]; (6)

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  $H_{\text{п}}/H_{\text{ф}}$ ,

де  $H_{\text{ф}}$  – фіктивний напір при нульовій подачі;  $H_{\text{п}}$  – 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  $H_{\text{п}}/H_{\text{ф}}$ , такі залежності перевірені експериментально, і наведені в літературі [5],[10].

Обстеження реальної теплової мережі показали, що фактичні витрати та подача теплоносія складає  $1120 \text{ м}^3/\text{год.}$ , максимальна подача теплоносія  $1200 \text{ м}^3/\text{год.}$ , перепад тиску на насосі  $12/4.8$  атмосфер.

З огляду на те, що номінальна продуктивність насоса ЦН-400-105 складає  $400 \text{ м}^3/\text{год.}$ , в мережі встановлено три насоси які працюють паралельно. Робочі параметри насоса наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Технічні параметри насоса тепломережі [11]

| Параметр                  | Значення   |
|---------------------------|------------|
| Тип                       | ЦН-400-105 |
| Р, кВт                    | 200        |
| n, об/хв                  | 1450       |
| QВЕР, м <sup>3</sup> /год | 400        |
| НВЕР, м                   | 105        |
| ККД, %                    | 80         |
| t доп, °С                 | 100        |
| Доп. кав. запас, м        | 4.5        |

Насос приводиться в рух електродвигуном, технічні параметри якого наведені в табл.2

Таблиця 2

Технічні характеристики електродвигуна приводу насосного агрегату [12]

| Параметр                | Значення    |
|-------------------------|-------------|
| Тип                     | МЗВР315MLA4 |
| Р, кВт                  | 200         |
| n, об/хв                | 1486        |
| ККД, %                  | 95,6        |
| Клас енергоефективності | 1E2         |

В даний час в тепломережі має місце дросельне регулювання продуктивності насоса. Робочою точкою насоса є точка перетину його напірної та гідравлічної характеристики мережі теплопостачання. У випадку, якщо 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.

На рис. 2 наведено розроблену нами у роботі [5] діаграму сумісної роботи насосного агрегату та тепломережі централізованого теплопостачання. Напірна характеристика насоса, (крива 1), наведена згідно даних виробника а гідравлічні характеристики тепломережі, (криві 2-а; 2-б; 2-в; 2-г) розроблено авторами.

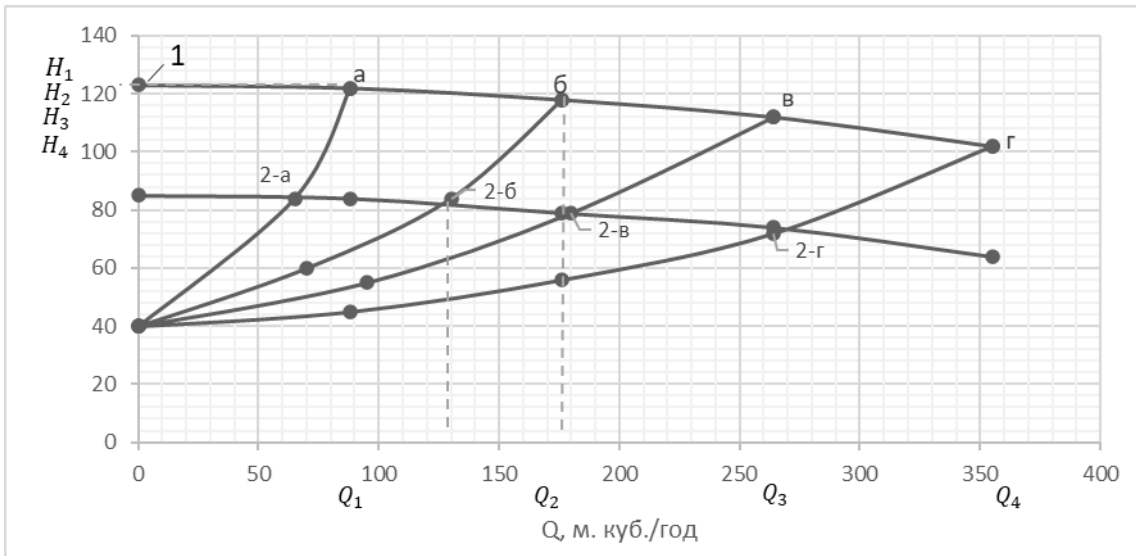


Рис. 2. Напірні характеристики насоса: (1) – при частоті обертання  $n_1$ ; (1-а) - при частоті обертання  $n_2$ ;  $n_2 < n_1$  [5]. Гідрравлічні характеристики мережі за різних теплових навантажень: 2-а; 2-б; 2-в; 2-г [розраховано авторами]

Результати проведеного нами у роботі [5] розрахунку параметрів частотно-регульованого електропроводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання наведено в табл. 3.

Таблиця 3

**Параметри частотно-регульованого електроприводу мережевого насоса**

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

За результатами розрахунків, як видно з табл. 3, 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. Наведені у таблиці дані є аналітичними виразами для визначення параметрів частотно-регульованого електроприводу, а саме діапазону регулювання швидкості, який складає 1:4; діапазону зміни споживаної потужності від 10кВт до 160кВт та зміни моменту від 65Нм до 1040Нм. Це дає інформацію для вибору електродвигуна та перетворювача частоти, як основних структурних елементів електроприводу.

Для вибору методу керування частотним перетворювачем проаналізуємо літературні джерела. Так, у роботі [1], Загірняком М. В. та співавторами детально викладено методи керування частотним перетворювачем: “Розрізняють два основні принципи керування перетворювачами частоти – скалярне і векторне. При скалярному керуванні відбувається формування фазних напруг на основі заданих значень амплітуди і частоти, які отримуються шляхом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Скалярне керування забезпечує постійну перевантажувальну здатність електропривода незалежно від частоти напруги, проте має місце зниження моменту, що створюється двигуном, при низьких частотах (при  $f = 0,1f_n$ ). Максимальний діапазон регулювання швидкості обертання ротора при незмінному моменті опору для електроприводу зі скалярним керуванням досягає 1:10.

Даний принцип є найбільш простим способом реалізації частотного керування і використовується для приводу механізмів, які не висувають високих вимог до якості регулювання швидкості. У першу чергу, це стосується електроприводів насосів, вентиляторів, компресорів. Даний клас механізмів має широку потенційну здатність енерго- і ресурсозбереження, які успішно реалізуються при впровадженні вказаного типу перетворювачів.

Недоліками скалярного керування без зворотних зв'язків (при законі керування  $U / f = const$ ) є: низька якість регулювання швидкості як керуючої, так і збурюючої дії; відсутність режиму роботи на упор, тобто при надмірних моментах навантаження привод вимикається під дією струмового захисту; важко

реалізувати керування поточозчепленням у функції моменту двигуна. Для реалізації більш складних законів керування використовуються замкнені системи регулювання з різними зворотними зв'язками.

До другого принципу систем керування належить система векторного керування, яка забезпечує характеристики асинхронного двигуна близькі до регульованого електроприводу постійного струму. Проте перетворювачі частоти з системою векторного керування є значно дорожчими за перетворювачі частоти скалярного керування[1].

Отже, результати розрахунків наведені в табл. 3 та характеристика методів керування перетворювачем частоти дає підстави для вибору перетворювача частоти з скалярним управлінням. Для оцінювання техніко-економічних показників нами порівнюються два варіанти електроприводу:

- 1) варіант з перетворювачем частоти з скалярним керуванням;
- 2) варіант з перетворювачем частоти з векторним керуванням.

Таблиця 4

**Технічні характеристики перетворювачів частоти обраних нами для комплектації двох варіантів електроприводу наведено в табл. 4 [13]**

| Параметр    | Значення             | Значення            |
|-------------|----------------------|---------------------|
| Тип         | ACQ580-01-363A-4     | CHINT NVF2G-200/PS4 |
| P, кВт      | 200                  | 200                 |
| Частота, Гц | Від 0 до 500         | Від 0 до 400        |
| Керування   | Скалярне та векторне | Скалярне            |
| U, В        | 250 до 500           | 220 + 33 / 380 + 57 |
| ККД, %      | 98                   | 98                  |
| t, °C       | 55                   | 55                  |
| I, А        | 545                  | 545                 |

Для оцінювання техніко-економічних показників розрахуємо економічну ефективність застосування електроприводів за двома варіантами, перший варіант електропривод з застосуванням частотного перетворювача з векторним керуванням ACQ580-01-363A-4 - 414 000 грн. з ПДВ, другий варіант з скалярним керуванням CHINT NVF2G-200/PS4 - 300 200 грн з ПДВ. Кожен з цих варіантів генерує фінансові потоки від економії електроенергії. В роботі [4] отримано результати економії електроенергії від запровадження частотно-регульованого електроприводу порівняно з дросельним регулюванням.

Оцінювання техніко-економічних показників оцінюємо за методом чистої приведеної вартості вище названих варіантів електроприводу. Вихідними даними для розрахунку є капітальні затрати, тобто інвестиції у закупівлю частотних перетворювачів та річні суми економії електроенергії, згенеровані з використанням варіантів електроприводів. Оскільки в обох варіантах електроприводу використовується один і той же електродвигун 4A315B4 [12], то їх вартість і суми виключаються. Вартість ACQ580-01-363A-4 - 450 000 грн, а вартість CHINT NVF2G-200/PS4 - 300 200 грн. Ціна 5,6 грн за 1кВт\*год для підприємств [14].

Щорічна кількість економії згенерованої електроенергії складає 59 тис. кВт\*год., що у грошовому виразі складає Чиста приведена вартість визначається за формулою:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - IC \quad (6)$$

де,  $NCF_t$  — чистий грошовий потік на  $t$ -ому кроці розрахункового періоду, грн.,

$IC$  — обсяг інвестиційних вкладень, грн.,

$i$  — коефіцієнт дисконту [15]

$$NCF = 59 * 10^3 (\text{кВт*год}) * 5,6 (\text{грн}) = 330 400 \text{ грн.}$$

$$NPV_1 = \frac{330 400}{(1+0.2)^1} + \frac{330 400}{(1+0.2)^2} + \frac{330 400}{(1+0.2)^3} + \frac{330 400}{(1+0.2)^4} + \frac{330 400}{(1+0.2)^5} - 450 000 = 538 \text{ тис. грн.}$$

$$NPV_2 = \frac{330 400}{(1+0.2)^1} + \frac{330 400}{(1+0.2)^2} + \frac{330 400}{(1+0.2)^3} + \frac{330 400}{(1+0.2)^4} + \frac{330 400}{(1+0.2)^5} - 300 200 = 688 \text{ тис. грн.}$$

Отримані результати розрахунків показують, що чиста приведена вартість електроприводу за варіантом 2 буде більша на 150 тис. грн.

### Висновок

Визначення параметрів частотного регулювання електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого тепlopостачання є необхідною передумовою для синтезу його структури та визначення технічних параметрів його основних структурних елементів: перетворювача частоти та електродвигуна.

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, його напірна характеристика та споживана електрична потужність. За споживаною потужністю та обертовим моментом визначається швидкість обертання двигуна. За потужністю електродвигуна та режимів перевантаження обирається частотний перетворювач. Метод керування частотного перетворювача має бути обраний з урахування

діапазону регулювання швидкості електроприводу, додаткових вимог щодо енергоефективності та економічної ефективності.

Результати дослідження показують, що для частотно-регульованого електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання, для досягнення необхідних техніко-економічних показників прийнятним є електропривод із застосуванням перетворювача частоти з скалярним методом керування, що може значно знизити капітальні витрати. Проте в кожному конкретному випадку проектування та комплектування електроприводів насосних агрегатів вибір варіанту має здійснюватися на основі інженерних розрахунків.

Перспектива подальших досліджень полягає в оптимізації режимів роботи насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання. Критеріями оптимізації можуть бути обрані максимум енергоефективності та мінімум експлуатаційних витрат.

### Література

1. Загірняк М. В. / Сучасні перетворювачі частоти в системах електропривода / Загірняк М. В., Коренькова Т. В., Калінов А. П., Гладир А. І., Ковальчук В. Г. – Харків Видавництво «Точка», 2017. – 206 с.
2. 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.
3. Мошноріз М. Система керування запуском насосного агрегата станції водопостачання / Микола Мошноріз, Володимир Грабко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – 2008. – Випуск 30. – С. 310–311.
4. Федірко М. М. Модернізація електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення їх енергоефективності / М. М. Федірко, В. Я. Брич, Р. Ф. Бруханський, В. Я. Брич, Р. Р. Олішинська // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2023. – № 5-6 (183-184). – С. 27-40. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/95c4042b-15ab-414e-8df4-80b844be9a73>
5. Федірко М. М. / Частотне регулювання електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором / Федірко М. М., Брич В. Я., Горлачук М. А., Завитій О. П., Головка Р. В. // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2023. – № 7-8 (185-186). – С. 22-32. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/dfd80c4e-2867-4a53-a582-79054de5b181>
6. Федірко М.М. / Термодинамічні імперативи модернізації електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення енергоефективності / Федірко М.М., Головка Р.В. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2023. – № 1. – С. 43–49 <http://energy.kpi.ua/article/view/297523>
7. 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>
8. Сотник М. І. Аналіз способів регулювання роботи насосних станцій комунального водопостачання / М. І. Сотник, С. О. Хованський, О. І. Дужак // Вісник СумДУ. Серія Технічні науки. – 2008. – № 2. – С. 152–157.
9. 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.
10. 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(6), p. 1144. doi: 10.3390/en12061144
11. Сумська насосна техніка : каталог продукції. URL: <https://sumnt.com/category/produkcija/>
12. Каталог АБВ Двигуни та генератори. URL: <https://new.abb.com/motors-generators-4>
13. Каталог АБВ Приводи АБВ для систем опалення, вентиляції і кондиціонування повітря <https://global.abb/group/en>
14. 24TV, розділ економіка – тарифи, тарифи на електроенергію. [https://24tv.ua/economy/tarif-svitlo-1-cherhvnyia-2024-yak-dlya-kogo-chomu-zroste-tsina\\_n2566027](https://24tv.ua/economy/tarif-svitlo-1-cherhvnyia-2024-yak-dlya-kogo-chomu-zroste-tsina_n2566027)
15. Боярко І. М. Інвестиційний аналіз / І. М. Боярко, Л. Л. Гриценко // КНЕУ. – 2011. – 400 с. [https://shron1.chtyvo.org.ua/Boiarko\\_Iryna/Investytsiyniy\\_analiz.pdf](https://shron1.chtyvo.org.ua/Boiarko_Iryna/Investytsiyniy_analiz.pdf)

### References

1. Zahirniak M. V. / Suchasni peretvoriuvachi chastoty v systemakh elektropryvoda / Zahirniak M. V., Korenkova T. V., Kalinov A. P., Hladyr A. I., Kovalchuk V. H. – Kharkiv Vydavnytstvo «Tochka», 2017. – 206 s.
2. 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.
3. Moshnoriz M. Systema keruvannia zapuskom nasosnoho ahrehata stantsii vodopostachannia / Mykola Moshnoriz, Volodymyr Hrabko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «Kharkivskiy politekhnichnyi instytut». – 2008. – Vypusk 30. – S. 310–311.
4. Fedirko M. M. Modernizatsiia elektropryvodu nasosnykh ahrehativ merezhi tsentralizovanoho teplopstachannia v konteksti pidvyshchennia yikh enerhoefektyvnosti / M. M. Fedirko, V. Ya. Brych, R. F. Brukhanskyi, V. Ya. Brych, R. R. Olishynska // Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt. – 2023. – № 5-6 (183-184). – S. 27-40. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/95c4042b-15ab-414e-8df4-80b844be9a73>

5. Fedirko M. M. / Chastotne rehuliuвання електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого тепlopостачання на базі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором / Fedirko M. M., Brych V. Ya., Horlachuk M. A., Zavytii O. P., Holovko R. V. // Enerhozberezhennia. Enerhetyka. Enerhoaudyt. – 2023. – № 7-8 (185-186). – S. 22-32. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/dfd80c4e-2867-4a53-a582-79054de5b181>
6. Fedirko M.M. / Termodynamichni imperatyvy modernizatsii електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого тепlopостачання в контексті підвищення енергоefektyvnosti / Fedirko M.M., Holovko R.V. // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia. – 2023. – № 1. – S. 43–49 <http://energy.kpi.ua/article/view/297523>
7. 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>
8. Sotnyk M. I. Analiz sposobiv rehuliuвання roboty насосних станцій комунального водopostачання / M. I. Sotnyk, S. O. Khovanskyi, O. I. Duzhak // Visnyk SumDU. Seriia Tekhnichni nauky. – 2008. – № 2. – S. 152–157.
9. 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.
10. 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(6), p. 1144. doi: 10.3390/en12061144
11. Kataloh produktsii . “Sumska насосna tekhnika”. URL: <https://sumnt.com/category/produkcija/>
12. Kataloh AVV Dvyhuny ta heneratory. URL: <https://new.abb.com/motors-generators> 4
13. Kataloh AVV Pryvody ABB dlia system opalennia, ventyliatsii y kondytsionuvannia povitria <https://global.abb/group/en>
14. 24TV, rozdil ekonomika – taryfy, taryfy na elektroenerhiu. [https://24tv.ua/economy/tarif-svitlo-1-cherhvnyia-2024-yak-dlya-kogo-chomu-zroste-tsina\\_n2566027](https://24tv.ua/economy/tarif-svitlo-1-cherhvnyia-2024-yak-dlya-kogo-chomu-zroste-tsina_n2566027)
15. Boiarko I. M. Investytsiinyi analiz / I. M. Boiarko, L. L. Hrytsenko // KNEU. – 2011. – 400 s. [https://shron1.chtyvo.org.ua/Boiarko\\_Iryna/Investytsiinyi\\_analiz.pdf](https://shron1.chtyvo.org.ua/Boiarko_Iryna/Investytsiinyi_analiz.pdf)