

М.М. Федірко¹, к.е.н., доцент. ORCID 0000-0001-8244-3478М.А. Горлачук¹, к.е.н., доцент. ORCID 0000-0001-8030-1193О.П. Завитій¹, к.е.н., доцент. ORCID 0000-0001-7439-6923О.А. Кошпаренко¹, студент¹Західноукраїнський національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ СТРУКТУРИ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СПОЖИВАНОЇ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ НАСОСНИХ АГРЕГАТІВ МЕРЕЖІ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ В КОНТЕКСТІ ПРОВЕДЕННЯ ЕНЕРГОАУДИТУ

Обґрунтовано підходи до визначення структури реактивної потужності споживаної електроприводом насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання та надано рекомендації щодо їх застосування при проведенні енергоаудиту для розробки заходів щодо підвищення їх коефіцієнта потужності. Визначено метод для розрахунку реактивної енергії споживаної як перетворювачем частоти, так і приводним асинхронним електродвигуном. Встановлено залежність реактивної потужності споживаної електродвигуном від його моменту та залежність реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти від потужності електродвигуна та його моменту. Ці залежності встановлено для режиму пропорційного керування $u/f = \text{const}$. Результати доводять що основна частка споживаної реактивної потужності припадає на електродвигун і залежить від режимів його роботи, в основному від величини його навантаження. Реактивна потужність споживана перетворювачем частоти залежить від потужності та моменту приводного електродвигуна відповідно до режиму його роботи і складає незначну частку від загальної споживаної електроприводом реактивної потужності.

Запропонований підхід дозволяє енергоаудитору при проведенні енергоаудиту частотно регульованих електроприводів насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання попередньо по спрощеній процедурі оцінити обсяг споживаної електроприводом реактивної енергії та відповідність режимів роботи мережі централізованого теплопостачання технологічним вимогам.

Ключові слова: реактивна потужність, електропривід насосних агрегатів, коефіцієнт потужності, перетворювач частоти, асинхронний електродвигун, закон пропорційного керування.

Вступ. Серед споживачів електричної енергії переважають електроприводи різного призначення, що споживають значну частку виробленої енергії. Загальна встановлена потужність асинхронних двигунів у складі електроприводів в Україні складає близько 45 млн. кВт[1]. Значна кількість електроприводів встановлена на устаткуванні, яке використовується на підприємствах різних галузей народного господарства України, в тому числі і на підприємствах комунальної теплоенергетики. Особлива увага при проведенні енергоаудиту підприємств комунальної теплоенергетики має бути приділена електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання. Це пов'язано з тим, що електроприводи насосних агрегатів найбільш енергоємні у цій галузі. Проблема загострюється тим що вони працюють в режимі змінного навантаження, яке залежить від термодинамічних та гідравлічних параметрів в мережі централізованого теплопостачання. Значний час робочого циклу вони працюють в режимі зниженого навантаження і у цьому випадку із зниженим коефіцієнтом корисної дії та зниженим коефіцієнтом потужності, що призводить до зниження енергоефективності електроприводу насосного агрегату загалом.

Питання енергоефективності електроприводу насосних агрегатів, розглядається в працях як зарубіжних, так і вітчизняних вчених, і вони стосуються здебільшого роботи насосних агрегатів в системах водопостачання. Зокрема, ці питання висвітлюються у роботі [2]. 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 [3].

Що стосується висвітлення проблеми енергоефективності електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання, то огляд літературних джерел показує що дослідженню цієї проблеми не приділяється належної уваги. У публікації [4] розглядається питання модернізації електроприводу насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання електродвигунами різних типів і класів енергоефективності при дросельному регулюванні продуктивності мережевого насоса. У публікації [5] ця проблема розглядається для частотно-регульованого електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання. У публікації [6] розглядається питання впливу

термодинамічних параметрів на енергоефективність електроприводів насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання.

У вище наведених публікаціях питання підвищення енергоефективності електроприводу насосних агрегатів розглядається в контексті споживаної активної потужності, що не в повному обсязі відображає суть проблеми споживаної з енергомережі потужності, оскільки реактивна потужність споживана електроприводами при знижених навантаженнях складає значну частку і не завжди при проведенні енергоаудиту адекватно оцінюється. Не вивченим залишається також питання споживання реактивної потужності структурними елементами електроприводу, а саме споживання реактивної потужності окремо перетворювачем частоти та окремо електродвигуном. Обґрунтування методики визначення структури споживання реактивної енергії може спростити її розрахунок та дати енергоаудитору можливість адекватно оцінити її споживання.

З огляду на вище наведене обґрунтування методики визначення структури споживання реактивної потужності споживаної електроприводами насосних агрегатів в мережі централізованого теплопостачання та її використання при проведенні енергоаудиту, при розробці заходів щодо підвищення коефіцієнта потужності є важливим науковим та практичним завданням.

У даному дослідженні обґрунтовуються методичні підходи до визначення структури реактивної потужності споживаної електроприводами насосних агрегатів та надаються рекомендації щодо їх застосування при енергоаудиті для розробки заходів щодо підвищення коефіцієнта їх потужності. Особливістю даної роботи є те, що споживана реактивна потужність визначається окремо для основних структурних елементів електроприводу; для перетворювачів частоти та електродвигунів.

Мета та завдання. Метою даної роботи є: теоретично обґрунтувати підходи до визначення структури споживаної реактивної потужності електроприводами насосних агрегатів систем централізованого теплопостачання при проведенні енергоаудиту для розробки заходів щодо підвищення коефіцієнта їх потужності та енергоефективності загалом.

Матеріал і результати досліджень. Частотно регульований електропривід на базі асинхронного електродвигуна з короткзамкненим ротором є споживачем як активної так і реактивної енергії. Для повноти оцінки його властивостей як споживача електричної енергії в уставленому режимі роботи частотно-регульованого електроприводу, розглянемо споживану ним з мережі реактивну потужність. Для розрахунку реактивної потужності на вході частотного перетворювача скористаємося формулами його мережевих характеристик, отриманих у припущенні відсутності вищих гармонік у кривих струмів та напруг перетворювача, електричних втрат у вентилях випрямляча та напівпровідникових ключах автономного інвертора напруги, а також втрат у сталі реакторів. При цих припущеннях реактивна потужність на вході частотного перетворювача визначається за формулою

$$Q = \frac{18}{\pi^2} \omega_0 \epsilon L_{p.vx} i_B^2 \quad (1)$$

Формула (1) показує, що реактивна потужність Q залежить від величини вихідного струму випрямляча i_B та індуктивного опору $X_{p.vx} = \omega_0 \epsilon L_{p.vx}$ комутувального реактора.

З огляду на те, що метою нашої роботи є визначення структури споживання реактивної енергії електроприводом насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання, ми будемо визначати реактивну енергію споживану як перетворювачем частоти, так і приводним двигуном.

Для цього розглянемо структуру частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату в мережі централізованого теплопостачання. На рис. 1 зображено структуру 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.



Рисунок 1 - Структура частотно-регульованого електроприводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання.

В мережі встановлено насосний агрегат, де в якості насоса використовується відцентровий насос ЦН-400-105 [7]. Для приводу насоса використовується асинхронний двигун класу ефективності типу

МЗВР315MLA4 потужністю 200кВт та частотою обертання 1450 обертів на хвилину [8]. В структурі електроприводу застосовується частотний перетворювач АСН580-07-363А-4 потужністю 200 кВт., напругою 380 В., струмом 363 А., і частотою 0- 500 Гц. [9]. Обстеження запропонованої нами для дослідження реальної теплової мережі централізованого теплопостачання показали, що фактичні витрати та подача теплоносія складає 1063 м³/год., максимальна подача (витрата) теплоносія 1200 М³/год., перепад тиску на насосі 12/4.8 атмосфер.

При цьому для забезпечення режиму роботи має місце паралельна робота трьох насосних агрегатів. Гідралічна потужність визначається витратою Q та напором насоса $H_{нас}$. 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 : $P_1 = \rho g Q H_{нас} + \Sigma P_{втр.нас} + \Sigma P_{втр.дв}$; де ρ – щільність теплоносія, g – прискорення вільного падіння [10].

Таким чином, для визначення споживання активної потужності електроприводом насосного агрегату необхідно розрахувати такі параметри, як напір та подачу теплоносія. За умови, що частота обертання насоса не регулюється, його продуктивність та напір змінюються дроселюванням, наслідком чого є значні втрати електроенергії в електроприводі. Зміна частоти обертання робочого колеса насоса призводить до зміни всіх його характеристик і, в першу чергу його продуктивності та напору. Перерахунок характеристик насоса на іншу частоту обертання здійснюється за допомогою формул приведення, Робота насосного агрегату розглядається в режимах, де витрата теплоносія протягом циклу роботи насосного агрегату змінюється відповідно до гідралічного навантаження, характерного для HVAC додатків. Типовий цикл роботи насоса, визначений регламентом Євросоюзу [3] і поділений на 4 режими. Особливістю циклу є те, що більшу частину часу насос працює з витратою набагато меншою за номінальну. Наприклад, з витратою 25 % від номінального значення насос працює відносний час $t_i/t_{\Sigma} = 44\%$, де t_{Σ} – сумарний час роботи, прийнятий рівним 24 годинам, t_i – час роботи насоса в даному режимі. Цей профіль навантаження є типовим для насосних систем із потребою у зміні витрати в широких межах.

Отже для визначення структури споживання реактивної електроенергії електроприводом насосного агрегату необхідно на базі значень споживання активної потужності та з урахуванням коефіцієнта завантаження електроприводу та відповідного йому коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності розрахувати реактивну потужність споживану електроприводом. Крім цього для розрахунку реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти(формула 1) необхідно визначити активну потужність та струм електродвигуна. Ці показники можуть бути розраховані виходячи із результатів отриманих на основі вище наведених формул.

Такі показники розраховуємо за методикою і за технічними даними складових елементів електроприводу розробленої нами і опублікованої у роботах[5,6] для електроприводу мережевого насосного агрегату. Результати розрахунків наведено у таблиці (1).

Таблиця 1 Параметри частотно регульованого електроприводу насосного агрегату мережі централізованого теплопостачання.

№	Режим роботи	P_1 , кВт	$\cos \varphi$	Q , в. о.	S , кВт*А	I_1 , А	M , в. о.
1	Режим: $k_{зав} = 0,25$	7,3	0,7	0,04	10,4	16	0,05
2	Режим: $k_{зав} = 0,5$	31,6	0,8	0,15	39,5	63,2	0,24
3	Режим: $k_{зав} = 0,75$	82,2	0,81	0,31	101,4	164,4	0,55
4	Режим: $k_{зав} = 1$	192,3	0,86	0,59	223,6	384,6	0,98

Примітка: Розраховано для електроприводу насосного агрегату з електродвигуном $P_{ном} = 200$ кВт а $N_{ном} = 1450$ об/хв. Реактивна потужність віднесена до $P_{ном}$, а момент до $M_{ном}$.

На рис. 2 показано залежність реактивної потужності споживаної електродвигуном від його моменту. З рисунка видно що при певному режимі роботи, наприклад при коефіцієнті завантаження 0,5 із збільшенням моменту електродвигуна споживана ним реактивна потужність зростає. При збільшенні коефіцієнта завантаження реактивна потужність споживана електродвигуном виражена у відносних одиницях зменшується. Ця залежність дозволяє енергоаудитору при проведенні попереднього енергоаудиту спрощено визначити реактивну потужність для електродвигуна за його параметрами $P_{ном}$, $N_{ном}$ використовуючи систему відносних одиниць.

На рис. 3 та 4 наведено залежність реактивної потужності Q споживаної частотним перетворювачем та коефіцієнта його потужності $\cos \varphi$ при різних фіксованих значеннях коефіцієнта завантаження електродвигуна. Розрахунки виконані для двигуна типу МЗВР315MLA4 в режимах пропорційного керування $u/f = \text{const}$ і при сталості повного потокозчеплення ротора. При побудові

залежностей використані безрозмірні величини: реактивна потужність віднесена до номінальної потужності, момент — до номінального значення моменту та частота — до номінального значення частоти напруги живлення двигуна.

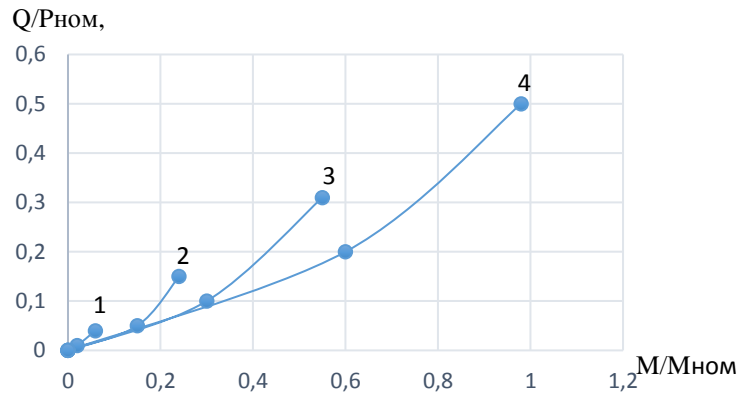


Рисунок 2 - Залежність реактивної потужності споживаної електродвигуном від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f=const$.

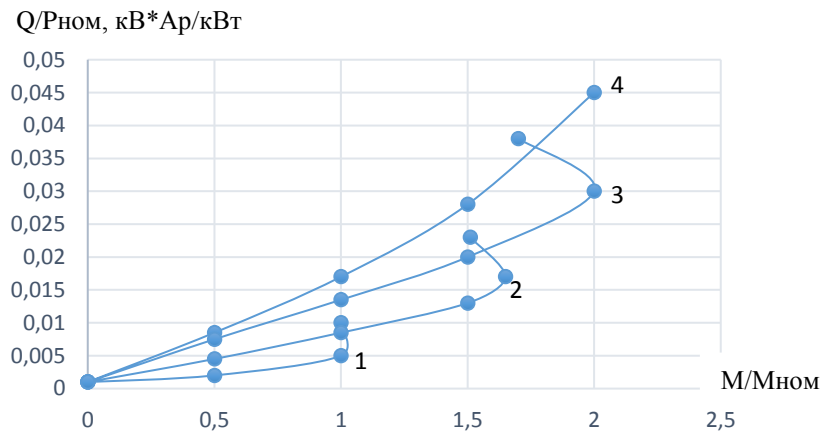


Рисунок 3 - Залежність реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти в структурі електроприводу насосного агрегату від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f=const$.

Ця залежність дозволяє при проведенні енергоаудиту попередньо оцінити споживання реактивної потужності споживаної перетворювачем частоти використовуючи систему відносних одиниць. З рисунка видно що реактивна потужність споживана перетворювачем частоти складає незначну частку від загальної потужності споживаної електроприводом. Так, наприклад, для номінального моменту електродвигуна вона складає 1,8% при коефіцієнті завантаження= 1.

На рисунку 4 показано залежність коефіцієнта потужності перетворювача частоти від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f=const$.

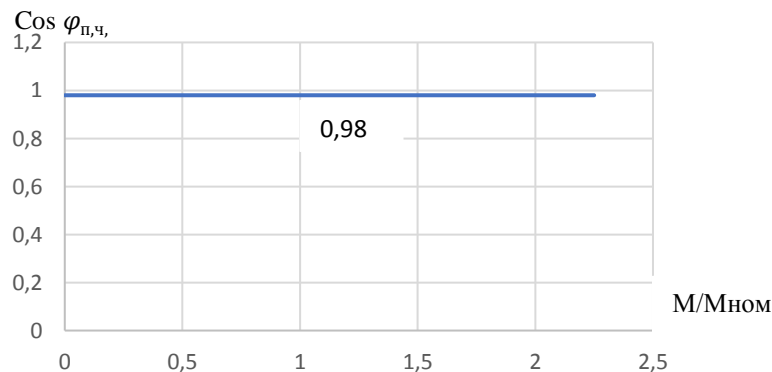


Рисунок 4 - залежність коефіцієнта потужності перетворювача частоти від моменту електродвигуна в режимі пропорційного управління $u/f=const$.

З рисунка 4 видно що розрахований коефіцієнт потужності складає 0,98 що відповідає значенням які наводяться виробниками. Він практично не залежить від моменту електродвигуна електроприводу насосного агрегату.

Висновок. Дослідження проведенні для частотно регульованого електроприводу насосного агрегату реальної найбільш типової в мережі централізованого теплопостачання, доводять що структура споживаної електроприводом насосного агрегату реактивної потужності характеризується реактивною потужністю споживаною перетворювачем частоти та реактивною потужністю приводного електродвигуна. При цьому основна частка споживаної реактивної потужності припадає на електродвигун і залежить від режимів його роботи, в основному від величини завантаження і збільшується при збільшенні його моменту. Реактивна потужність споживана перетворювачем частоти залежить від потужності та моменту приводного електродвигуна відповідно до режиму його роботи і складає незначну частку від загальної споживаної електроприводом реактивної потужності. Отже для зменшення споживаної електроприводом реактивної потужності необхідно корегувати режими роботи двигуна, вирівнювати величину його завантаження та здійснювати заходи щодо компенсації реактивної енергії. Запропонований підхід до визначення структури споживаної електроприводом насосного агрегату реактивної потужності дозволяє енергоаудитору при проведенні енергоаудиту попередньо оцінити обсяг споживаної реактивної енергії використовуючи номінальні технічні характеристики електродвигуна. Перспектива подальших досліджень полягає в уточненні параметрів що стосуються застосування такого підходу в залежності від діапазону потужностей електроприводу.

Список використаної літератури:

1. Закладний, О. М. / Енергозбереження засобами промислового електропривода: навчальний посібник [текст] / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей, - К: Кондар, 2005. – 408 с.
2. В. В. Грабко /Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання : монографія / В. В. Грабко, М. М. Мошноріз. – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 138 с.
3. *Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012* <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
4. Федірко М. М. / Модернізація електроприводу насосних агрегатів мережі централізованого теплопостачання в контексті підвищення їх енергоефективності / Федірко М. М. Брич В. Я., Бруханський Р. Ф., Брич В. Я., Олішинська Р. Р. / "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. / Журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». – 2023. - №1. С. 43 – 49 <http://energy.kpi.ua/article/view/297523>
7. Сумська насосна техніка. URL: <https://sumnt.com/>
8. Каталог АВВ Двигуни і генератори. URL: <https://new.abb.com/motors-generators%204>
9. Каталог АВВ Приводи АВВ для систем опалення, вентиляції і кондиціонування повітря. URL: <https://global.abb/group/en>
10. Коренькова Т. В. / Режимы работы насосных та вентиляторных установок із автоматизованим електроприводом: навч. посібник / Т. В. Коренькова, О. О. Сердюк, В. Г. Ковальчук. – Кременчук: Видавництво ПП Щербатих О. В., 2013. – 200 с. URL: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf

M. Fedirko¹, PhD in Economics, Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-8244-3478

M. Horlachuk¹, PhD in Economics, Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-8030-1193

O. Zavytii¹, PhD in Economics, Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-7439-6923

O. Koshparenko¹, student

¹West Ukrainian National Institute

DETERMINATION OF THE STRUCTURE OF REACTIVE POWER CONSUMED BY THE ELECTRIC DRIVE OF PUMP UNITS OF THE CENTRALIZED HEAT SUPPLY NETWORK IN THE CONTEXT OF ITS ENERGY AUDIT

Approaches to determining the structure of the reactive power consumed by the electric drive of pumping units of the centralized heat supply network are substantiated, and recommendations are given for their application when conducting their energy audit for the development of measures to increase their power factor. A method for calculating the reactive energy consumed by both the frequency converter and the drive asynchronous electric motor is defined. The dependence of the reactive power consumed by the electric motor on its torque and the dependence of the reactive power consumed by the frequency converter on the power of the electric motor and its torque have been established. These dependencies are set for the proportional control mode $u/f=const$. The results prove that the main part of the consumed reactive power falls on the electric motor and depends on its operating modes, mainly on the amount of its load. The reactive power consumed by the frequency converter depends on the power and torque of the drive electric motor in accordance with its operating mode and is a small part of the total reactive power consumed by the electric drive.

The proposed approach allows the energy auditor, when conducting an energy audit of frequency-regulated electric drives of pump units of the centralized heat supply network, to preliminarily, using a simplified procedure, estimate the amount of reactive energy consumed by the electric drive and the modes of operation and the compliance of the modes of operation of the centralized heat supply network with technological requirements.

Keywords: reactive power, electric drive of pumping units, power factor, frequency converter, asynchronous electric motor, law of proportional control.

References:

1. Zakladny, O. M. / Energy saving by means of an industrial electric drive: study guide [text] / O. M. Zakladny, A. V. Prakhovnyk, O. I. Solovei, - K: Kondar, 2005. – 408 p.
2. V. V. Grabko / Method and means of optimizing the operation of electric drives of a water supply pumping station: monograph / V. V. Grabko, M. M. Moshnoriz. – Vinnytsia: VNTU, 2011. – 138 p.
3. Commission Regulation (EC) No 641/2009 of July 22, 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for glandless standalone circulators and glandless circulators integrated in products, amended by the Commission Regulation (EU) No 622/2012 of July 11, 2012 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32009R0641>
4. Fedirko M. M. / Modernization of the electric drive of pump units of the centralized heat supply network in the context of increasing their energy efficiency / Fedirko M. M., Brych V. Ya., Brukhansky R. F., Brych V. Ya., Olishynska R. R. / "Energy conservation. Energy. Energy audit". – 2023. – No. 5-6 (183-184). – P. 27-40 / <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/95c4042b-15ab-414e-8df4-80b844be9a73>
5. Fedirko M.M. / Frequency regulation of the electric drive of pump units of the centralized heat supply network based on asynchronous motors with a short-circuited rotor / Fedirko M.M., Brych V.Ya., Gorlachuk M.A., Zavytiy O.P., Golovko R. V. / "Energy conservation. Energy. Energy audit". – 2023. – No. 7-8 (185-186). - P. 22-32. / <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/dfd80c4e-2867-4a53-a582-79054de5b181>
6. Fedirko M.M. / Thermodynamic imperatives of modernizing the electric drive of pumping units of the district heating network in the context of increasing energy efficiency. / Fedirko M.M., Golovko R.V. / Magazine "Energy: economy, technology, ecology". – 2023. - #1. P. 43 – 49 <http://energy.kpi.ua/article/view/297523>
7. Sumy pumping equipment. URL: <https://sumnt.com/>
8. Catalog ABB Engines and generators. URL: <https://new.abb.com/motors-generators%204>
9. ABB catalog ABB drives for heating, ventilation and air conditioning systems. URL: <https://global.abb/group/en>
10. Korenkova T. V. / Modes of operation of pump and fan installations with an automated electric drive: training. manual / T.V. Korenkova, O.O. Serdyuk, V.G. Kovalchuk. – Kremenchuk: Publishing House PP Shcherbatykh O. V., 2013. – 200 p. URL: http://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/rewumu%20robotu.pdf

Надійшла: 10.03.2025

Received: 10.03.2025