ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

HYDRAULIC CONSTRUCTION, WATER ENGINEERING AND WATER TECHNOLOGIES

УДК 631.624
DOI https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.5.7

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА ВОДОПОДАЧА НАСОСНИХ СТАНЦІЙ КАХОВСЬКОЇ ЗРОШУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Волошин М.М. *– кандидат технічних наук,*
доцент кафедри гідротехнічного будівництва,
водної та електричної інженерії
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0003-0467-1963
Кузьмич Л.В. *– доктор технічних наук,*
головний науковий співробітник
Інституту водних проблем і меліорації
Національної академії аграрних наук України
ORCID ID: 0000-0003-0727-0508
Scopus-Author ID: 57192956583

У статті наведено принципи енергоефективної водоподачі насосних станцій Каховської зрошувальної системи. Визначено проблеми, які потребують невідкладного розв'язання з огляду на аналіз літературних джерел. Розкрито способи регулювання подачі насосних установок. Наявні способи регулювання спрямовані на вирішення технологічних завдань і практично не враховують енергетичні аспекти транспортування води. Подано порядок перерахунку за законами геометричної та гідродинамічної подібностей. Розкрито основні залежності, які характеризують енергетику насосів, а саме: потужність, споживану насосом; зміну основних параметрів роботи насосного агрегата за зміни швидкості обертання робочого колеса насоса; потужність, споживану приводом двигуна. Для точних розрахунків запропоновано отримати вихідні дані: паспортні дані насоса і його приводного двигуна. Висловлено пропозицію одержати результати вимірів за повністю закритої напірної засувки, а також результати вимірів за відкритої напірної засувки. Наведено графічну характеристику споживаної потужності за різних засобів регулювання швидкості обертання вала насоса. Подано добовий графік витрат води за результатами вимірів. Запропоновано розрахунок величини економічного ефекту. Цей розрахунок заснований на визначенні різниці між величинами використання електроенергії за регулювання тиску насоса через дроселювання напірною засувкою і за регулювання за допомогою ЧРП. Наведено додаткові позитивні моменти під час прийняття рішення щодо впровадження частотного регулювання привода. Розкрито доцільність використання ЧРП. Визначено, за допомогою яких чинників зміниться ефект під час установки

перетворювачів частоти. В якості прикладу для впровадження перетворювачів частоти розглянуто Каховську зрошувальну систему. Подано характеристику насосних станцій зрошення в Херсонській області.

Ключові слова: *енергоефективність, водоподача, зрошувальні насосні станції, способи регулювання, частотно-регулювальний привод.*

Voloshin M.M., Kuzmych A.A. Energy efficient water supply of pumping stations of Kakhovka irrigation system

The article presents the principles of energy efficient water supply of pumping stations of Kakhovka irrigation system. The problems that need to be addressed immediately from the analysis of literature sources are listed. Methods of regulating the supply of pumping units are given. Existing methods of regulation are aimed at solving technological problems and practically do not take into account the energy aspects of water transportation. The order of recalculation according to the laws of geometric and hydrodynamic similarity is presented. The main dependences characterizing the energy of pumps are presented, namely: power consumed by the pump; change of the basic parameters of work of the pump unit at change of speed of rotation of an impeller of the pump; power consumed by the motor drive. For accurate calculations, it is proposed to obtain the initial data: passport data of the pump and its drive motor. It is proposed to obtain the results of measurements with a fully closed pressure valve, as well as the results of measurements with an open pressure valve. The graphic characteristic of the power consumption at various means of regulation of speed of rotation of a shaft of the pump is resulted. The daily schedule of water consumption according to the results of measurements is presented. The calculation of the magnitude of the economic effect is proposed. The calculation of economic efficiency is based on determining the difference between the values of electricity use when regulating the pump pressure by throttling the pressure valve and when adjusting by means of CRP. Additional positive moments at decision-making of introduction of frequency regulation of the drive are resulted. The expediency of using CRP is given. It is presented due to which factors the effect will change when installing frequency converters. The Kakhovka irrigation system is presented as an example for the introduction of frequency frequency converters. The characteristics of pumping stations for irrigation in the Kherson region are given.

Key words: *energy efficiency, water supply, irrigation pumping stations, control methods, frequency control drive.*

Постановка проблеми. Підвищення цін на електроенергію та воду зумовлює дедалі більший інтерес до енергозбережних технологій. На це також спрямовує Закон України «Про енергозбереження», в якому зазначено, що «енергоефективні продукція, технологія, обладнання – це продукція або метод, засіб її виробництва, що забезпечують раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів, порівняно з іншими варіантами використання або виробництва продукції однакового споживчого рівня чи з аналогічними техніко-економічними показниками» [1].

Стан вивчення проблеми. Аналіз літературних джерел [2; 3; 4] свідчить, що найбільшого поширення в нашій країні набув спосіб традиційного регулювання подачі насосних установок, який полягає в дроселюванні (для зменшення або збільшення подачі за допомогою відкриття або закриття засувки) напірних ліній насосів і в зміні у загальному числі агрегатів, що працюють, по одному з технологічних параметрів: тиску на колекторі або в командній точці мережі, рівня в приймальному та регулювальному резервуарах.

Завдання і методика досліджень. Наведені способи регулювання спрямовані на вирішення технологічних завдань і практично не враховують енергетичні аспекти транспортування води.

За такого регулювання від 5 до 15%, а інколи до 25–30% споживаної електроенергії витрачається нераціонально через: втрати енергії в органі, що дроселює; створення надлишкових тисків у трубопровідній мережі; течі та непродуктивні витрати води в мережі й у споживача; збільшення геометричного підйому під час відкачування води з резервуарів каналізаційних насосних станцій тощо.

Насосні установки працюють цілодобово. Від їх роботи безпосередньо залежить енерго- і ресурсозбереження. Про ефективність регулювання режимів роботи відцентрових насосів за допомогою зміни кутової швидкості робочих коліс відомо давно. Характеристики відцентрових насосів перераховуються за законами геометричної і гідродинамічної подібностей. Згідно з цими законами, в разі зміни частоти обертання подача насоса змінюється пропорційно першому ступеню, тиск – пропорційно другому ступеню, потужність – пропорційно третьому ступеню частоти обертання, коефіцієнт корисної дії практично не залежить від частоти обертання. Таким чином, якщо за номінальної частоти обертання nн насос під час подачі Qн розвиває тиск Нн і споживає потужність Nн, то за частоти обертання на новій характеристиці цій точці відповідатиме точка з подачею $Q = Qн (n/nн)$, тиском $H = Hн (n/nн)^2$, потужністю на валу $N= Nн (n/nн)^3$. Наведемо порядок розрахунку:

1. Основні залежності, що характеризують енергетику насосів.

Потужність, споживана насосом:

$$N = (Q \cdot H \cdot 9{,}81) / ККД, кВт, \quad (1)$$

де Q – продуктивність, $м^3/с$; Н – висота тиску, що дорівнює сумі висот всмоктування і нагнітання, м. в. с.; ККД – коефіцієнт корисної дії установки, що приймається відповідно до каталогу або паспорта.

Зміна основних параметрів роботи насосного агрегата в разі зміни швидкості обертання робочого колеса насоса («формули подібності»):

$$N_1 / N_2 = n_1^3 / n_2^3, \quad (2)$$

$$H_1 / H_2 = n_1^2 / n_2^2, \quad (3)$$

$$Q_1 / Q_2 = n_1 / n_2, \quad (4)$$

де n – число обертів вала робочого колеса в хв.; N – потужність, споживана насосом, кВт; Н – тиск, що створюється насосом, м. в. с.; Q – продуктивність насоса, $м^3/с$. Індекси 1 і 2 відносяться до першого і другого режимів роботи устаткування, відповідно.

Для визначення потужності, споживаної приводним двигуном (Nд, Вт) за відомого його струму, застосовується така формула:

$$Nд = 1{,}73 \cdot Iд \cdot U \cdot Cos\ Ф, \quad (5)$$

де Ід – струм фази двигуна, А; U – напруга двигуна, В; Cos Ф – коефіцієнт потужності двигуна.

2. Отримання вихідних даних для розрахунку.

Допоміжними даними для розрахунку є паспортні дані насоса та його приводного двигуна, занесені в табл. 1.

Таблиця 1

Паспортні дані насоса та його приводного двигуна

Параметр	Значення
Потужність насоса, кВт	
ККД насоса	
Тиск насоса, м	
Подача насоса, $м^3/ч$	
Потужність двигуна, кВт	
Струм двигуна, А	
ККД двигуна	
Cos Ф двигуна	

Основні дані вимірюються за різних режимів роботи насосного агрегата за допомогою відповідних технічних засобів і записуються у таблиці, приклади яких наведені нижче.

Таблиця 2

Результати вимірів за повністю закритої напірної засувки

Вимірюваний параметр	Потужність Nmin, кВт, або струм Imin, А
Засіб виміру	Ватметр, амперметр або лічильник електроенергії

Примітка: виміри за закритої напірної засувки слід проводити максимально оперативно, щоб уникнути перегріву насоса.

Таблиця 3

Результати вимірів за повністю відкритої напірної засувки

Вимірюваний параметр	Потужність Nmax, кВт, або струм Imax, А	Витрата води Qmax, $м^3/ч$
Засіб виміру	Ватметр, амперметр або лічильник електроенергії	Витратомір

Примітка: виміри за відкритої напірної засувки бажано проводити під час максимального розбору води.

За даними табл. 2 і 3 будується графік (рис. 1) залежності споживаної потужності N від порівняної витрати води Q/Qmax за різних способів регулювання. Для споживаної потужності в разі дроселювання можна записати вираз:

$$Nдрос = Nmin + (Nmax – Nmin) \cdot (Q/Qmax). \quad (6)$$

Для споживаної потужності за частотного регулювання можна записати вираз:

$$Nчрп = Nmax \cdot (Q/Qmax). \quad (7)$$

Залежність споживаної потужності за дроселювання Nдрос від порівняної витрати Q/Qmax (Q – поточна витрата, Qmax – максимальна витрата, зазначена

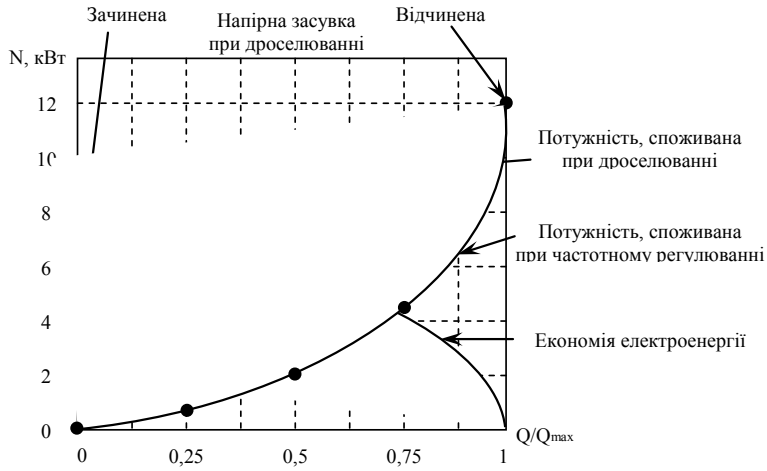

Рис. 1. Споживана потужність за різних засобів регулювання швидкості обертання вала насоса

в табл. 3) утворюється на графіку з'єднанням точок Nmax і Nmin прямою лінією, залежність споживаної потужності за використання ЧРП Nчрп від порівняної витрати Q/Qmax визначається під час обчислення виразу (7) з підстановкою в нього виміряної раніше величини Nmax і декількох значень Q/Qmax (наприклад, від 0 до 1 з кроком 0,25).

Для отримання інформації про завантаження насоса визначається графік його роботи за періодами часу з приблизно однаковим навантаженням (витратою води). Для вимірів використовується витратомір. Виміри добової витрати виконуються впродовж 2–3 днів. За результатами таких вимірів заповнюється табл. 4. Отримані дані щодо добової витрати усереднюються, і будується графік добової витрати води. Приклад графіка наведений на рис. 2.

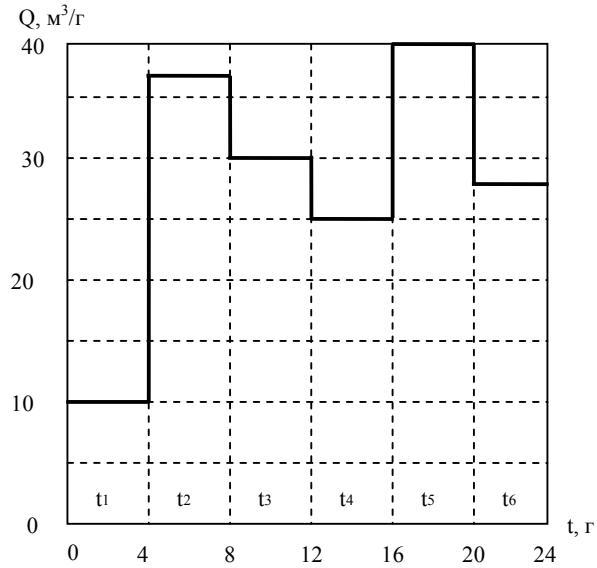

Рис. 2. Добовий графік витрати води за результатами вимірів

Таблиця 4

Добова і загальна витрати води

Період часу ti, година	t1	t2	t3	t4	t5	...
Добова витрата Qi, м³/ч (перший день вимірів)						
Добова витрата Qi, м³/ч (другий день вимірів)						
Добова витрата Qi, м³/ч (третій день вимірів)						
Середня добова витрата Qi ср, м³/ч						

Якщо виникають складності з визначенням даних за добовим графіком витрати води (наприклад, через неможливість зняття даних про витрату кожні декілька годин або через відсутність технічних засобів для автоматизації цього процесу, таких як самописець, реєстратор тощо), допускається виміряти лише загальну витрату за декілька (7–10) днів і скласти приблизний вигляд добового графіка витрати води. Під час розрахунків вважається, що устаткування працює в режимі, за якого забезпечуються нормальні параметри подачі води.

3. Розрахунок величини економічного ефекту.

Розрахунок економічної ефективності базується на визначенні різниці між величинами використання електроенергії *за регулювання тиску насоса через дроселювання напірною засувкою та за регулювання тиску насоса за допомогою ЧРП.*

Для кожного раніше певного періоду роботи, в якому визначено приблизно постійне навантаження насоса Qi, розраховується економія потужності: ΔNi = Nдросі– Nчрпі. Величини Nдросі і Nчрпі обираються за рис. 1 або обчислюються за формулами (6) і (7). Величина витрати Qi береться з рис. 2. або табл. 4. Потім визначається сумарна економія електроенергії за певний часовий інтервал роботи устаткування (наприклад, за добу) за формулою:

$$к\ \Delta Эк = \Delta Ni \cdot ti,\ i=1, \quad (8)$$

де ΔЭк – економія електроенергії за використання ЧРП замість дросельного регулювання, кВт·год.; ΔNi – економія потужності за і-й період (наприклад, з 0.00 до 4.00), кВт; ti – час, упродовж якого привід працює з постійним навантаженням Qi насоса (наприклад, 4 години), год.; к – число періодів часу з постійними значеннями ΔNi · ti (наприклад, 6 періодів).

За цілорічної роботи насоса з приблизно постійним добовим графіком витрати річна економія електроенергії ΔЭг визначається множенням ΔЭк на число днів роботи насоса в році, тобто можна вважати: ΔЭг = ΔЭк · 365. В разі наявності в році декількох періодів часу з характерними добовими графіками витрати, наприклад зима – літо тощо, ΔЭк обчислюється для кожного такого періоду, а ΔЭг обраховується як сума заощадженої електроенергії ΔЭк за всіма періодами, в яких діють свої добові графіки витрати. Далі визначається вартість заощадженої електроенергії за тарифом, що діє для підприємства в цій енергосистемі, з урахуванням чинників економії, наприклад води, електроенергії. З досвіду для оцінки вартості зниження витрати холодної води може вводитися коефіцієнт 1,15, для гарячої води – 1,2, для повітря – 1,1, для палива – 1,02. Таким чином, економія електроенергії та ресурсів становитиме для холодної і гарячої води:

$$СТээ = (1{,}15…1{,}2) \cdot Тэ \cdot \Delta Эг, \quad (9)$$

де СТээ – вартість заощадженої електроенергії та ресурсів, грн; Тэ – тариф на електроенергію в енергосистемі, грн/кВт·год.

Для визначення терміну окупності, а, отже, оцінки економічної ефективності використання ЧРП використовується формула:

$$Ток = СТчрп / СТээ, \quad (10)$$

де Ток – термін окупності установки ЧРП, рік; СТээ – вартість заощадженої електроенергії та ресурсів за один рік, грн; СТчрп – вартість ЧРП, грн.

Під час ухвалення рішення про доцільність впровадження ЧРП слід враховувати, що, окрім економічного ефекту від заощадження електроенергії, використання ЧРП дає низку переваг, зокрема:

– знижується знос запірної арматури, оскільки більшість часу засувки повністю відкриті;

– більшість часу насоси працюють за знижених тисків, що зменшує течі в системі водоподачі;

– знижується знос комутаційної апаратури, оскільки її перемикання відбувається за відсутності струму;

– знижується знос підшипників двигуна і насоса, а також крильчатки завдяки плавній зміні числа обертів за відсутності великих пускових струмів;

– зменшується небезпека аварій завдяки виключенню гідравлічних ударів;

– забезпечується одночасний захист двигуна від струмів короткого замикання, замикання на землю, струмів перевантаження, однофазного режиму, недопустимих перенапружень;

– знижується рівень шуму, що особливо важливо в разі розташування насосів поблизу житлових або службових приміщень;

– спрощується подальша комплексна автоматизація об'єктів системи водоподачі [5].

4. Перетворювачі частоти.

Перетворювач частоти (або частотно-регулювальний електропривід) – це статичний перетворювальний пристрій, призначений для зміни швидкості обертання асинхронних електродвигунів змінного струму.

Асинхронні електродвигуни мають значну перевагу перед електродвигунами постійного струму завдяки простоті конструкції та зручності обслуговування. Це зумовлює їх однозначне переважання і повсюдне використання практично в усіх галузях промисловості, енергетики та в міській інфраструктурі.

Відомо, що регулювання швидкості обертання робочого механізму можна здійснювати за допомогою різних пристроїв (способів), серед яких найбільш відомі та поширені такі:

– механічний варіатор;

– гідравлічна муфта;

– електромеханічний перетворювач частоти (системи «генератор – двигун»);

– опір, що додатково вводиться в статор або фазний ротор, тощо;

– статичний перетворювач частоти.

Перші чотири способи відрізняються різними комбінаціями і мають деякі недоліки:

– складності у використанні, обслуговуванні, експлуатації;

– низька якість і діапазон регулювання;

– неекономічність.

Всі вказані недоліки відсутні в разі використання перетворювачів частоти [6]. Регулювання швидкості обертання асинхронного електродвигуна в цьому випадку здійснюється за допомогою зміни частоти і величини напруги живлення двигуна. ККД такого перетворення становить близько 98%, з мережі споживається практично лише активний складник струму навантаження, мікропроцесорна система управління забезпечує високу якість управління електродвигуном і контролює безліч його параметрів, запобігаючи можливості розвитку аварійних ситуацій.

Ефект за установки перетворювачів частоти досягається завдяки таким чинникам:

– економії енергоресурсів;

– збільшенню термінів служби технологічного устаткування;

– зниженню витрат на планово-запобіжні та ремонтні роботи;

– забезпеченню оперативного управління й достовірного контролю за перебігом технологічних процесів тощо.

Значна економія електроенергії легко досягається за однієї умови – приводний механізм повинен що-небудь регулювати (підтримувати будь-який технологічний параметр). Таким чином, використання перетворювачів частоти на зрошувальних системах дасть змогу покращити експлуатаційні можливості насосних станцій, а також дозволить раціонально використовувати воду та електроенергію.

Результати досліджень. Наведемо приклад впровадження перетворювачів частоти. Каховська зрошувальна система (рис. 3.) є найбільшою на території України, яка після повного розвитку повинна була забезпечити зрошення земель на території площею 780 тис. га між Північнокримським каналом і Молочним лиманом.

Джерелом зрошення сільськогосподарських угідь системи є Каховське водосховище. Для подачі води з нього у головний Каховський магістральний канал було споруджено головну насосну станцію, розраховану на подачу 530 м^3/с води на висоту 25 м. Систему збудовано з закритою внутрішньогосподарською мережею, застосуванням високопродуктивної дощувальної техніки, автоматизацією водорозподілу і поливу, конструктивними рішеннями, що забезпечують коефіцієнт корисної дії та земельного використання. Всі сільськогосподарські угіддя Каховської зрошувальної системи зрошуються за допомогою машинного водопідйому, переважно за двоступінчастою схемою: перший підйом здійснюється головною насосною станцією, другий – господарськими насосними станціями, які забирають воду з магістрального каналу та розподільників і одночасно створюють напір у закритій зрошувальній мережі, потрібний для роботи дощувальних машин. Додатковий підйом води з магістрального каналу проводиться тільки для подачі у два розподільних канали: Р-1 та Р-1-1.

Міжгосподарська зрошувальна мережа має вигляд відкритих каналів із застосуванням протифільтраційних заходів, зокрема ґрунто- і бетоноплівкових екранів. Дренажні, поверхневі та скидні води відводяться скидними каналами загальною довжиною майже 160 км до акумулювальних ставків і водоймищ, які використовуються для рибництва.

Головна насосна станція Каховської зрошувальної системи також постачає воду іншим зрошувальним системам: Приазовській, Сірогозькій, Північнокримському каналу, Генічеській, Каланчацькій тощо. За даними БУВР нижнього Дніпра наведемо табл. 5.

Станом на 01.11.2021 р. насосними станціями Каховської зрошувальної системи було подано 621,9 млн м^3 води. Для цього було витрачено 182,9 млн/кВт електроенергії.

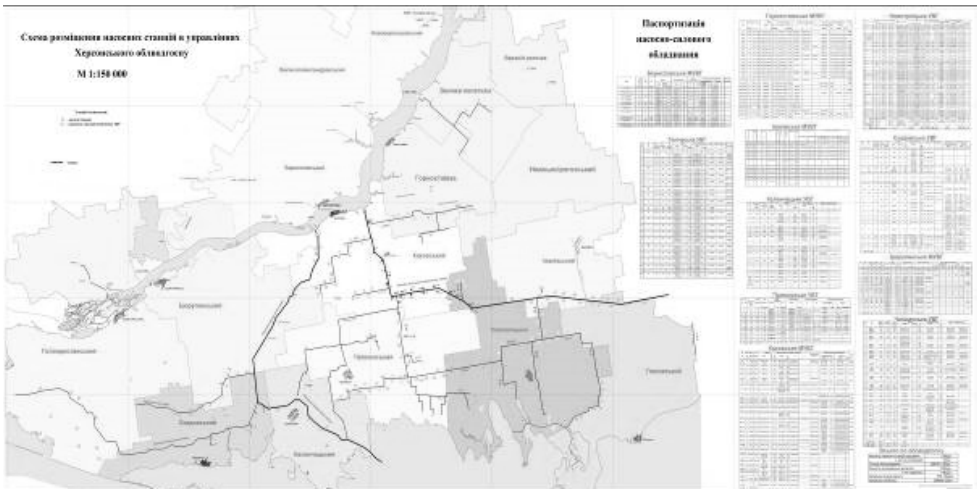

Рис. 3. Схема розміщення насосних станцій на Каховській зрошувальній системі

Таблиця 5

Характеристика насосних станцій зрошення в Херсонській області

Кількість насосних станцій зрошення,	239	шт.
з них на консервації	33	шт.
Площа обслуговування	299301,625	га
Кількість встановлених агрегатів,	1226	шт.
з них ті, що працюють	1162	шт.
Загальна продуктивність	359,19	$м^3/с$
Загальна потужність	366669,5	кВт

Висновки та пропозиції. За підвищення цін на електроенергію та воду запропоновано впроваджувати енергозбережні технології, зокрема застосування на насосних станціях Каховської зрошувальної системи перетворювачів частоти. Впровадження перетворювачів частоти дозволить щорічно економити близько 15–30% електроенергії та, відповідно, коштів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Про енергозбереження : Закон України від 22 грудня 2005 р. № 3260-IV. Київ : Урядовий портал, 2005. 2 с.

2. Лезнов Б.С. Окупаемость регулируемого электропривода в насосных установках. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2002. № 12. С. 21–28.

3. Волошин М.М. Розрахунок економічної ефективності впровадження частотних перетворювачів для насосних агрегатів : методичні рекомендації. Херсон : РВВ ХДАУ «Колос», 2012. 40 с.

4. Куряпов В.Н., Мальцев А.П. Потенциал энергосбережения и его практическая реализация. *Энергонадзор и энергоэффективность*. 2003. № 3. С. 33–40.

5. Инструкция по расчету экономической эффективности применения частотно-регулируемого электропривода. Москва : Научно-исследовательский институт электроэнергетики (АО ВНИИЭ) ; Московский энергетический институт, 1997. 12 с.

6. Шкредин Д.Г. Преобразователи частоты в энергосберегающих приводах насосов. *Водоснабжение и санитарная техника*. 2004. № 7. С. 10–17.

REFERENCES:

1. Pro enerhozberezhennya : Zakon Ukrayiny vid 22.12.2005 № 3260-IV. Kyyiv: Uryadovyy portal. 2 s. [in Ukrainian]

2. Leznov, B.S. (2002) Okupayemost' reguliruyemogo elektroprivoda v nasosnykh ustanovkakh. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. № 12. S. 21–28. [in Russian]

3. Voloshyn, M.M. (2012) Rozrakhunok ekonomichnoyi efektyvnosti vprovadzhennya chastotnykh peretvoryuvachiv dlya nasosnykh ahrehativ : metodychni rekomendatsiyi. Kherson : RVV KHDAU "Kolos". 40 s. [in Ukrainian]

4. Kuryapov, V.N., Mal'tsev, A.P. (2003) Potentsial energosberezheniya i yego prakticheskaya realizatsiya. *Energonadzor i energoeffektivnost'*. № 3. S. 33–40. [in Russian].

5. Instruktsiya po raschetu ekonomicheskoy effektivnosti primeneniya chastotno--reguliruyemogo elektroprivoda (1997) Moskva : Nauchno-issledovatel'skiy institut elektroenergetiki (AO VNIIE) ; Moskovskiy energeticheskiy institute. 12 s. [in Russian]

6. Shkredin, D.G. (2004) Preobrazovateli chastoty v energosberegayushchikh privodakh nasosov. *Vodosnabzheniye i sanitarnaya tekhnika*. № 7. S. 10–17. [in Russian]