

УДК 62-83(075.8)

DOI <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.26>**О. В. РЯСНА**

старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-6917-6950

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ

кандидат технічних наук,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

В. О. КРАВЧЕНКО

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4185-8279

В. М. КОЗІН

кандидат технічних наук,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9821-7774

О. Ю. ЮРЧЕНКО

старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3047-6654

СКАЛЯРНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В СИСТЕМІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

У даній роботі розглянуто дослідження, яке спрямоване на підвищення ефективності роботи електроприводу насосної системи водопостачання в умовах виробництва. Призначення роботи – оптимізація енергоспоживання, підвищення надійності та забезпечення стабільного тиску у водопровідній мережі за допомогою сучасних електроприводних технологій.

Розглянуто систему автоматизованого керування, що складається з асинхронного електродвигуна, насоса, частотного перетворювача, контролера, сенсорів, напівпровідникових елементів (тиристорів та МОП-транзисторів) і панелі керування. Використання частотних перетворювачів дозволяє змінювати швидкість обертання насоса відповідно до потреби у воді, що знижує витрати електроенергії та подовжує термін служби обладнання.

Методологія дослідження базується на моделюванні роботи електроприводу насосного агрегату в середовищі MatLab Simulink, що демонструє переваги використання сучасних технологій та елементів автоматики для досягнення високої енергоефективності та оптимізації витрат на електроенергію. Впровадження передових силових напівпровідникових компонентів у поєднанні з перетворювачами частоти дозволяє плавно регулювати швидкість двигуна, значно зменшуючи споживання енергії та запобігаючи перевантаженням.

Результати досліджень показують, що застосування автоматизованих систем контролю тиску та рівня води додає ще один рівень надійності та енергоефективності. Система забезпечує стабільність водопостачання навіть при змінних навантаженнях, запобігаючи аваріям та зносу обладнання. Частотне регулювання значно знижує гідравлічні втрати, зменшує шум та вібрацію, покращуючи експлуатаційні характеристики насосної системи.

Оригінальність дослідження полягає у використанні скалярного методу керування роботою електроприводу, що дозволяє спростити алгоритми управління та покращити енергоефективність системи.

Практична цінність роботи полягає в можливості впровадження розробленої системи автоматизованого керування в реальні насосні станції, що сприятиме зменшенню енергоспоживання та підвищенню надійності їхньої роботи.

Використання електроприводу в системах водопостачання забезпечує автоматичне регулювання роботи насосного обладнання, підвищуючи енергоефективність, знижуючи експлуатаційні витрати та продовжуючи

термін служби обладнання завдяки плавному запуску, оптимальному навантаженню та інтеграції з релейним захистом для запобігання аварійним ситуаціям. Для забезпечення безперебійної роботи обладнання необхідно регулярно проводити контроль технічного стану електроприводу насоса та його обслуговування відповідно до встановлених норм і стандартів.

Ключові слова: асинхронний двигун, регулювання швидкості обертання, насосне обладнання, скалярний метод, частотний перетворювач, транзистори, МОП-транзистори, біполярні транзистори з ізолюваним затвором, напівпровідникові елементи: тиристори (одноопераційні, керовані), моделювання MatLab Simulink, датчики, контролер, автоматичне управління, контроль технічного стану електроприводу насосу, обслуговування.

O. V. RYASNAYA

Senior Lecturer at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-6917-6950

O. YU. SAVOYSKYI

PhD, Associate Professor at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

V. O. KRAVCHENKO

PhD, Associate Professor, Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4185-8279

V. M. KOZIN

PhD, Associate Professor at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9821-7774

O. YU. YURCHENKO

Senior Lecturer at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-3047-6654

SCALAR CONTROL METHOD OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES IN WATER SUPPLY SYSTEM

The study is aimed at improving the efficiency of the electric drive of the water supply pumping system in production conditions.

The purpose of the work is to optimize energy consumption, increase reliability and ensure stable pressure in the water supply network using modern electric drive technologies.

An automated control system is considered, consisting of an asynchronous electric motor, pump, frequency converter, controller, sensors, semiconductor elements (thyristors and MOS transistors) and a control panel. The use of frequency converters allows you to change the pump rotation speed in accordance with the need for water, which reduces electricity consumption and extends the service life of the equipment.

The research methodology is based on modeling the operation of the electric drive of the pumping unit in the MatLab Simulink environment, which demonstrates the advantages of using modern technologies and automation elements to achieve high energy efficiency and optimize electricity costs. The introduction of advanced power semiconductor components in combination with frequency converters allows you to smoothly adjust the engine speed, significantly reducing energy consumption and preventing overloads.

The results show that the use of automated pressure and water level control systems adds another level of reliability and energy efficiency. The system ensures the stability of water supply even under variable loads, preventing accidents and equipment wear. Frequency control significantly reduces hydraulic losses, reduces noise and vibration, improving the performance of the pumping system.

The originality of the research lies in the use of a scalar method of controlling the operation of the electric drive, which allows simplifying control algorithms and improving the energy efficiency of the system.

The practical value of the work lies in the possibility of implementing the developed automated control system in real pumping stations, which will help reduce energy consumption and increase the reliability of their operation.

The use of an electric drive in water supply systems provides automatic regulation of the operation of pumping equipment, increasing energy efficiency, reducing operating costs and extending the service life of the equipment due to smooth start-up, optimal loading and integration with relay protection to prevent emergency situations. To ensure

uninterrupted operation of the equipment, it is necessary to regularly monitor the technical condition of the pump electric drive and its maintenance in accordance with established norms and standards.

Key words: asynchronous motor, speed control, pumping equipment, scalar method, frequency converter, transistors, MOSFETs, insulated gate bipolar transistors, semiconductor elements: thyristors (single-ended, controlled), MatLab Simulink modeling, sensors, controller, automatic control, monitoring the technical condition of the pump electric drive, maintenance.

Постановка проблеми

Спрямований на підвищення ефективності роботи електроприводу насосної системи водопостачання у виробничій сфері, зумовлений зростаючій потреби в енергозбереженні та оптимізації витрат на технологічні процеси. У сучасній промисловості стабільне та економічне водопостачання є важливим чинником, що безпосередньо впливає на продуктивність, якість і безпеку виробництва. Оскільки насосні установки є одними з найбільш енергоємних елементів інфраструктури, їхня оптимізація дає змогу суттєво зменшити експлуатаційні витрати.

Використання скалярного керування асинхронними двигунами забезпечує плавне регулювання швидкості обертання, що сприяє зниженню енергоспоживання. Якщо тиск або рівень води виходять за допустимі межі, система автоматично активує або вимикає відповідні насоси, запобігаючи аварійним ситуаціям та передчасному зношенню обладнання [5, 6].

Споживання води протягом доби коливається, з піковими витратами вранці та ввечері, та низьким рівнем вдень і вночі. При зміні споживання тиск у системі регулюється перетворювачем частоти, що плавно коригує швидкість обертання насоса для стабільного тиску. Прогрес у керованих асинхронних електроприводах став можливим завдяки розвитку потужних напівпровідникових компонентів, таких як тиристори та сучасні МОП- і біполярні транзистори. У системах водопостачання можна застосовувати методи контролю тиску у водопровідній мережі.

Сучасні системи регулювання тиску та продуктивності турбомеханізмів класифікуються за типом електричного струму та видом приводних двигунів, ділять на групи [7]: приводні системи на основі двигунів постійного струму; керовані приводи із синхронними електродвигунами; керовані системи з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, які управляються механічними регуляторами та електромагнітними муфтами; приводні системи, що працюють на багатошвидкісних асинхронних двигунах; керовані приводи з асинхронними двигунами, оснащеними фазним ротором; приводні системи для асинхронних двигунів із регулюванням напруги; приводи на основі асинхронних двигунів із частотним перетворювачем.

Один із ключових аспектів підвищення ефективності – правильний вибір насосного обладнання. Насос повинен відповідати фактичним потребам системи за параметрами продуктивності та натиску, що дозволяє уникнути зайвих енергетичних витрат. Крім того, використання сучасних енергоефективних електродвигунів класу IE3 або IE4 сприяє зниженню енергетичних втрат завдяки мінімізації теплових втрат і механічного зношування [10, с. 12].

Одним із найбільш ефективних методів керування насосним обладнанням є впровадження частотних перетворювачів. Вони дозволяють змінювати швидкість обертання двигуна залежно від поточного рівня споживання води. Завдяки застосуванню цих технологій можна досягти зниження енергоспоживання на 20–50 % [10, с. 22].

Графічні залежності наочно ілюструють переваги цих пристроїв у порівнянні з традиційними методами керування насосами. На рисунку 1 представлено зміну напірних характеристик насосного агрегату залежно від частоти обертання. Крива 1 відповідає номінальній характеристиці, яка визначається стандартною частотою обертання приводу, тоді як криві 2–4 демонструють зміну характеристик при зниженій частоті обертання.

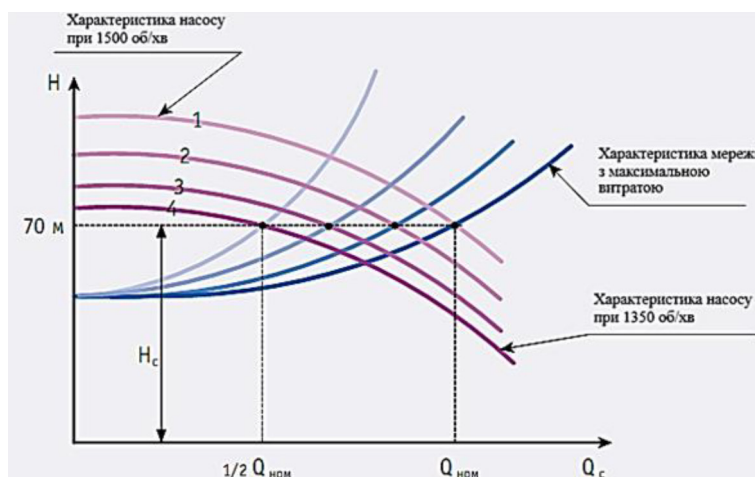


Рис. 1. Характеристики насоса та системи з регулюванням частоти

Варто підкреслити, що робота насосного обладнання на знижених швидкостях значно зменшує рівень шуму та вібрацій, що позитивно впливає на умови експлуатації. Це особливо важливо для житлових районів і промислових зон, де такі фактори можуть відігравати значну роль.

Формулювання мети дослідження

Регулювання електроприводів дозволяє стабільно підтримувати рівень тиску в системі, що знижує витрати на обслуговування та продовжує термін служби обладнання. Модернізація систем за допомогою елементів автоматизації та регулювання дозволяє оптимізувати витрати та знизити енергоспоживання. Автоматизована система, окрім частотного перетворювача, включає контролер і сенсори, що забезпечують стабільну роботу насоса при змінному навантаженні. Це дозволяє інтегрувати систему з іншими комплексами для моніторингу та діагностики, що знижує витрати та гарантує безперервність процесів.

Сучасні частотні перетворювачі оснащені широким спектром функцій, спрямованих на підвищення енергоефективності та захисту насосного обладнання. Вони забезпечують плавний запуск і зупинку, що запобігає гідравлічним ударам і зменшує навантаження на трубопроводи та з'єднання насосної системи. Крім того, вбудовані захисні механізми, такі як захист від перевантаження, перегріву та короткого замикання, гарантують безпечну та стабільну роботу системи. Функції енергозбереження дозволяють оптимізувати споживання електроенергії, зокрема завдяки автоматичному регулюванню швидкості обертання насоса відповідно до поточного рівня споживання води.

Значну роль у зручності експлуатації відіграють інтуїтивний інтерфейс і можливість дистанційного керування. Частотні перетворювачі, що використовуються в насосних системах, часто підтримують функції віддаленого моніторингу та контролю, що дає змогу оперативно змінювати параметри роботи без необхідності фізичного доступу до обладнання. Це особливо актуально для автоматизованих систем водопостачання та насосних станцій, які потребують постійного моніторингу та регулювання робочих параметрів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Виконаємо розрахунок механічних та електромеханічних характеристик асинхронного електродвигуна насосного агрегату відповідно до заданого закону $\frac{U_{1H}}{f}$. Розраховуємо для частот $f_1 = 50, 40, 30, 15$ Гц.

Знаходимо відносне значення частот напруги живлення [13, с. 24]:

при вищевказаних частотах 1, 0,8, 0,6, 0,3 Гц за формулою 1:

$$f_{1/1,2,3,4} = \frac{f_{1H}}{f_{1H}}. \quad (1)$$

Визначаємо фазну напругу обмотки статора асинхронного електродвигуна насоса – 220, 176, 132, 66 В відповідно формули 2:

$$U_{1H1, 2, 3, 4} = z_p \cdot f_{1H1}. \quad (2)$$

Згідно з досліджуваними частотами напруги живлення, проводимо розрахунок величин швидкості ідеального холостого ходу – 314,16; 251,33; 188,49; 94,29 рад/с [13], використовуючи формулу 3:

$$\omega_{01,2,3,4} = \frac{2\pi f_{1H1}}{p}. \quad (3)$$

Розраховуємо втрати в роторі під час роботи з насосним агрегатом під час навантаження. Визначаємо функцію навантаження.

Вентиляторне навантаження для насосного агрегату можна представити такою функцією [12]:

$$M_c = M_0 + (M_{с.ном} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^{(X-1)}, \quad (4)$$

де M_c – моменти навантаження насосного агрегату при швидкості обертання ω ; $M_{с.ном}$ – моменти навантаження при швидкості обертання $\omega_{ном}$; M_0 – моменти тертя у вузлах; X – показник степені, що для насосного навантаження відповідає $X = 3$.

Аналіз механічних характеристик показує, що при 15 Гц кутова швидкість становить ~100 рад/с, а момент – 10 Н · м, що підходить для легких навантажень. При 30 Гц швидкість зростає до 200 рад/с, а момент – до 15 Н · м, забезпечуючи більшу потужність і швидкість.

Моделювання роботи АД насосного агрегату виконаємо на платформі MATLAB Simulink. Для цього знайдемо деякі наступні параметри електродвигуна [11].

Досліджувані значення індуктивності обмотки ротора складає 0,00801 Гн за формулою 5:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2\pi f_{1H}}. \quad (5)$$

Значення індуктивності фази обмоток статора складає 0,012 Гн:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2\pi f_{1H}}. \quad (6)$$

Величина індуктивності намагнічування є 0,18 Гн:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2\pi f_{1H}}. \quad (7)$$

Модель імітації прямого пуску асинхронного двигуна насосного агрегату представлена на рис. 2. На рис. 3 і 4 зображені перехідні характеристики швидкостей та моментів під час прямого запуску асинхронного двигуна насосного агрегату.

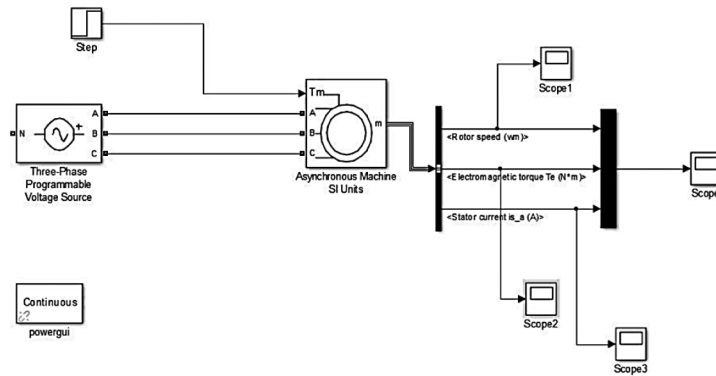


Рис. 2. Імітаційна модель прямого пуску АД насосного агрегату

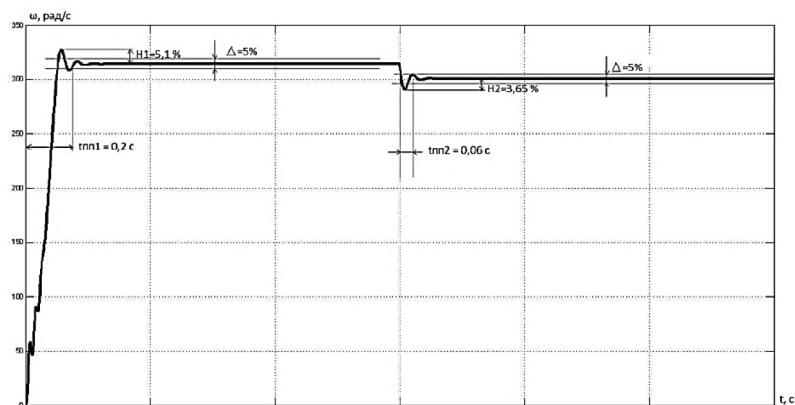


Рис. 3. Перехідна характеристика швидкості АД при прямому пуску

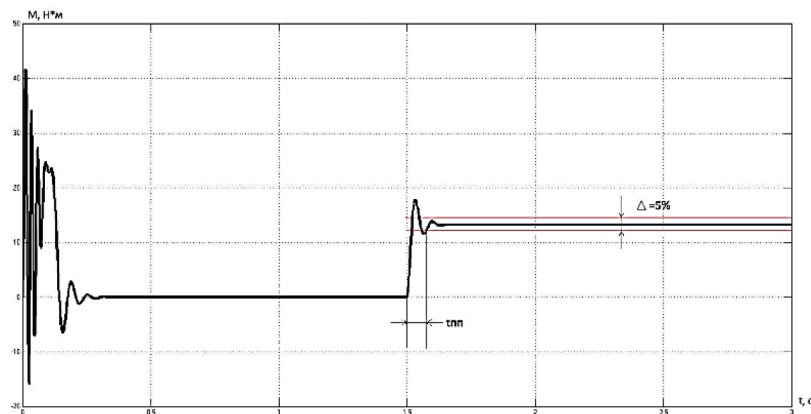


Рис. 4. Перехідна характеристика моменту АД при прямому пуску

Отримані результати (рис. 3 та рис. 4) показують, що під час прямого пуску час перехідного процесу показує перерегулювання. І при стрибку навантаження час перехідного процесу становить, перерегулювання.

Розроблена в MATLAB Simulink імітаційна модель скалярного керування швидкістю обертання АД насосного агрегату з автоматичною системою регулювання води в резервуарі зображена на рис. 5.

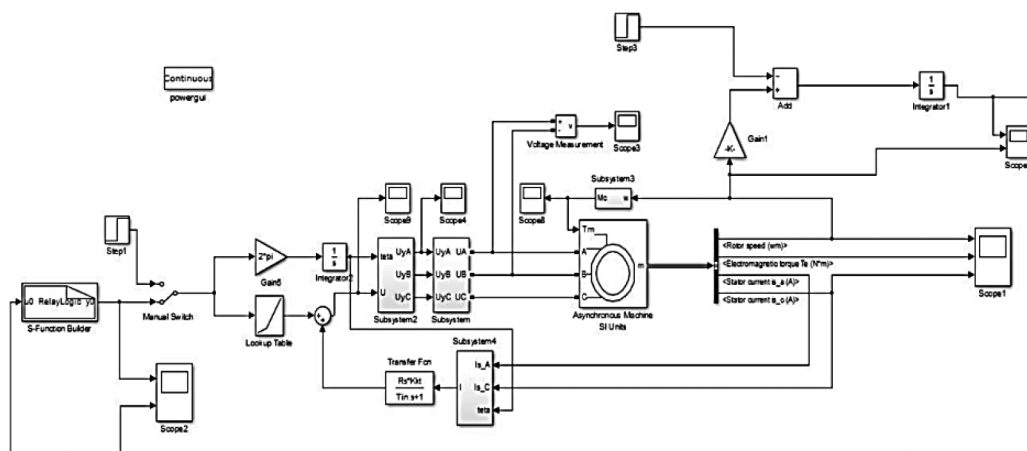


Рис. 5. Імітаційна модель скалярного керування швидкістю обертання АД насосного агрегату з автоматичною системою регулювання води в резервуарі

Структурна схема системи скалярного частотного керування електроприводом насосного агрегату, розроблена на основі імітаційної моделі, показана на рис. 6.

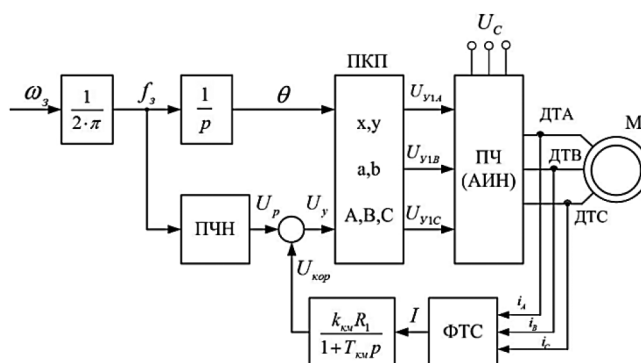


Рис. 6. Структурна схема системи скалярного частотного керування насосного агрегату

У цій моделі використано автоматизовану систему контролю рівня води в резервуарі на основі релейної логіки (S-FunktionBuilder). При рівні води понад 3 м насос вмикається (0 Гц), а при падінні нижче 1,5 м вмикається (50 Гц), підтримуючи циклічний процес наповнення.

Моделювання показало, що без відбору води резервуар (100 м³) заповнюється за 15,55 годин, а підйом рівня з 1,5 м до 3 м триває 5 годин. При споживанні води цей час збільшується до 10 годин.

Висновки

Впровадження частотних перетворювачів у систему керування насосами водопостачання дозволяє знизити енергоспоживання на 20–50 % завдяки регулюванню швидкості обертання насоса. Автоматизовані системи контролю тиску та рівня води забезпечують стабільність роботи насосного обладнання і мінімізують ризик аварійних ситуацій. Використання частотного перетворювача дозволяє забезпечити плавний запуск і зупинку насоса, що знижує механічні навантаження на обладнання, подовжуючи його термін служби.

Моделювання показало, що застосування скалярного керування для насосного агрегату дозволяє досягти значної економії енергоспоживання та знизити експлуатаційні витрати. Моделювання системи з автоматичним регулюванням рівня води підтвердило ефективність використання частотних перетворювачів для забезпечення стабільного водопостачання та оптимізації роботи насосного агрегату.

Список використаної літератури

1. Shankar, V.K.A., Umashankar, S., Paramasivam, S., & Hanigovszki, N. (2016). A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 181, 495–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070>
2. Augustyn, T. (2012). Energy efficiency and savings in pumping systems – The holistic approach. In *Proceedings of the Southern African Energy Efficiency Convention (SAEEC)*. <https://doi.org/10.1109/saeec.2012.6408587>
3. Moreno, M., Carrión, P., Planells, P., Álvarez, J.F.O., & Tarjuelo, J. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 98(4), 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.005>
4. Moshnoriz, M., Babiy, S., Payanok, A. (2021). Improving the efficiency of distributed water supply systems by means of an adjustable electric drive. *Scientific Horizons*. Vol. 24, No. 5. P. 19–34.
5. Грабко, В.В., Мошноріз М.М. (2011). Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: монографія. Вінниця : ВНТУ. 138 с.
6. Гарасьова, Н. Ю., Величко, Т. В. (2014). Оцінка ефективності роботи регульованого електроприводу насосу при змінному графіку водоспоживання. *Наукові записки, вип.15*. С. 86–88.
7. Мошноріз, М.М. (2009). Синтез структури пристрою керування запуском двигуна великої потужності. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Випуск 4(57), Ч. 1. С. 36–39.
8. Мошноріз, М., Грабко, В. (2008). Підвищення ефективності керування насосними агрегатами станції водопостачання. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського*. Випуск 3(50). Ч. 1. С. 145–148.
9. Попович, М.Г., Печеник, М.В., Кіселичник, О.І., Ковальчук О.В. (2002). Особливості організації екстремальних енергозберігаючих систем при різних методах керування асинхронних електроприводів. *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету*. Вип. 1(12). С. 129–132.
10. Xu, X., Zhou, H., & Mao, L. (2011). Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. <https://doi.org/10.1109/emeit.2011.6023557>
11. Bolognani, S., & Zampieri, S. (2013). A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(11), 2818–2833. <https://doi.org/10.1109/tac.2013.2270317>
12. Давидов, О.Ю., Бялобржеський, О.В. (2010). Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах. Діагностика в електромеханічних і енергетичних системах. *Вісник КрНУ ім. М. Остроградського*. Вип. 3/2010 (62). Ч. 1. С.132–136.
13. Zieliński, D., Stefańczak, B., & Jędryś, K. (2022). Phase-Independent Reactive Power Compensation Based on Four-Wire Power Converter in the Presence of Angular Asymmetry between Voltage Vectors. *Energies*, 15(2), 497. <https://doi.org/10.3390/en15020497>

References

1. Shankar, V.K.A., Umashankar, S., Paramasivam, S., & Hanigovszki, N. (2016). A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. *Applied Energy*, 181, 495–513. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070>
2. Augustyn, T. (2012). Energy efficiency and savings in pumping systems – The holistic approach. In *Proceedings of the Southern African Energy Efficiency Convention (SAEEC)*. <https://doi.org/10.1109/saeec.2012.6408587>
3. Moreno, M., Carrión, P., Planells, P., Álvarez, J.F.O., & Tarjuelo, J. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 98(4), 479–486. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.005>
4. Moshnoriz, M., Babiy, S., Payanok, A. (2021). Improving the efficiency of distributed water supply systems by means of an adjustable electric drive. *Scientific Horizons*. Vol. 24, No. 5. P. 19–34.
5. Hrabko, V.V., Moshnoriz M.M. (2011). Metod ta zasoby optymizatsii roboty elektropryvodiv nasosnoi stantsii vodopostachannia [Method and means of optimizing the operation of electric drives of a water supply pumping station] *monohrafiia – monograph*. Vinnytsia: VNTU. 138 s. [in Ukrainian]
6. Harasova, N.Yu., Velychko, T.V. (2014). Otsinka efektyvnosti roboty rehulovanoho elektropryvodu nasosu pry zminnomu hrafiku vodospozhyvannia [Evaluation of the efficiency of the adjustable electric pump drive with a variable water consumption schedule] *Naukovi zapysky – Proceedings*, vyp. 15. S. 86–88. [in Ukrainian].
7. Moshnoriz, M.M. (2009). Syntez struktury prystroiu keruvannia zapuskom dvyhuna velykoi potuzhnosti. [Synthesis of the structure of a high-power engine start control device.] *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi State Polytechnic University* Vypusk 4(57), Ch. 1. S. 36–39. [in Ukrainian].

8. Moshnoriz, M., Hrabko, V. (2008). Pidvyshchennia efektyvnosti keruvannia nasosnymy ahrehatamy stantsii vodopostachannia. [Increasing the efficiency of water supply station pumping unit control]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University*. Vypusk 3(50). Ch. 1. S. 145–148. [in Ukrainian].
9. Popovych, M.H., Pechenyk, M.V., Kiselychnyk, O.I., Kovalchuk O.V. (2002). Osoblyvosti orhanizatsii ekstremalnykh enerhozberihaiuchykh system pry riznykh metodakh keruvannia asynkhronnykh elektroprivodiv [Features of the organization of extreme energy – saving systems with different control methods for asynchronous electric drives]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University* Vyp. 1(12). S. 129–132. [in Ukrainian].
10. Xu, X., Zhou, H., & Mao, L. (2011). Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. <https://doi.org/10.1109/emeit.2011.6023557>
11. Bolognani, S., & Zampieri, S. (2013). A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 58(11), 2818–2833. <https://doi.org/10.1109/tac.2013.2270317>
12. Davydov, O.Yu., Bialobrzheskyi, O.V. (2010). Analiz zasobiv kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti v elektrotekhnichnykh systemakh [Analysis of reactive power compensation means in electrical systems. Diagnostics in electromechanical and power systems]. *Visnyk KrNU im. M. Ostrohradskoho – Bulletin of the M. Ostrohradskyi KrNU*. Vyp. 3/2010 (62). Ch. 1. C.132–136 [in Ukrainian].
13. Zieliński, D., Stefańczak, B., & Jędryś, K. (2022). Phase-Independent Reactive Power Compensation Based on Four-Wire Power Converter in the Presence of Angular Asymmetry between Voltage Vectors. *Energies*, 15(2), 497. <https://doi.org/10.3390/en15020497>