

РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ НАСОСНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ: ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЧАСТОТНОГО ТА КОМБІНОВАНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

Анатолій Семенов

кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри механічної та електричної інженерії

Полтавський державний аграрний університет, вул. Сковороди, 1/3, Полтава, Україна, 36003, [asemen2015@gmail.com.ua](mailto:asemen2015@gmail.com)

ORCID: 0000-0003-3184-6925

Наталія Семенова

начальник відділу маркетингу

Полтавський ливарно-механічний завод, вул. Ливарна, 12, Полтава, Україна, 36034, nvsemenova78@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4495-7712

У статті розглянуто проблему підвищення енергоефективності насосних установок систем водопостачання, які є найбільшими споживачами електроенергії в промисловості та комунальному господарстві. Актуальність дослідження зумовлена зростанням вартості енергоресурсів, необхідністю зниження викидів парникових газів і тенденціями до впровадження енергоощадних технологій. Показано, що більшість систем водопостачання в Україні з використанням насосних агрегатів працюють на базі нерегульованих асинхронних двигунів із прямим пуском від мережі, що призводить до підвищених пускових струмів, гідравлічних ударів, перевитрат електроенергії та до скорочення ресурсу обладнання. Традиційні методи регулювання подачі (дроселювання, ступінчасте керування) не відповідають сучасним вимогам енергоефективності. Перспективним напрямом є використання частотно-регульованих електроприводів (ЧРП), які забезпечують адаптацію продуктивності насосів до реального водоспоживання. Виконане математичне моделювання на основі законів подібності підтвердило зниження питомої енергоемності до $0,32 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$. Результати експериментальних вимірювань показали, що мінімальне значення цього показника досягалося в години пікового водоспоживання – $0,122 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$, тоді як у нічний час він зростав у кілька разів. Досліджено також комбіновану схему регулювання на базі двох насосних агрегатів, один з яких працює під керуванням ЧРП, а інший – у фіксованому режимі. Такий підхід дозволив знизити середню питому енергоемність до $0,12 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{м}^3$, що відповідає енергозбереженню до 60 %. Отримані результати підтверджують ефективність застосування частотного та комбінованого регулювання, підвищують надійність і довговічність обладнання та створюють передумови для цифровізації систем водопостачання в різних сферах діяльності.

Ключові слова: електропривод, частотне регулювання, комбіноване регулювання, енергоефективність, водопостачання, агропромисловий комплекс.

Актуальність роботи. Проблема підвищення енергоефективності у сучасних умовах є ключовим аспектом у розвитку промисловості, енергетики та комунального господарства. Постійне зростання вартості енергоресурсів, глобальні тенденції переходу до ресурсозбереження та необхідність зниження викидів парникових газів стимулюють пошук інноваційних технічних рішень у сфері експлуатації електромеханічних систем.

Серед великої кількості споживачів електроенергії особливе місце займають насосні установки, які забезпечують безперервне транспортування рідин і функціонування технологічних процесів у водопостачанні, сільському господарстві, промисловості та енергетиці [1]. За даними досліджень, їхня частка у загальному

балансі електроспоживання сягає 20-25 %, що робить ці системи пріоритетними об'єктами для модернізації [2, 3].

Більшість насосних агрегатів, що нині експлуатуються в Україні, оснащені нерегульованими асинхронними двигунами з прямим пуском від мережі. Така схема призводить до низки технічних проблем: підвищених пускових струмів, нерівномірності навантаження, гідравлічних ударів, передчасного зношування механічних елементів та значних енергетичних перевитрат у режимах неповного навантаження, оскільки такі системи не можливо розрахувати [4]. Традиційні методи регулювання подачі рідини (наприклад, дроселювання, ступінчасте керування кількістю працюючих насосів) в умовах добових

і сезонних коливань споживання не забезпечують необхідної ефективності [5].

В останні десятиліття у світі активно впроваджуються системи частотно-регульованого електроприводу (ЧРП) [6], які дозволяють плавно змінювати частоту живлення електродвигуна [7], а отже, керувати його швидкістю обертання і продуктивністю насоса. Це забезпечує зниження енерговитрат на 30–50 %, стабілізацію тиску в мережі, зменшення пускових струмів та збільшення терміну служби обладнання [8–10].

На основі здійсненого аналізу, можемо відзначити, що системи ЧРП водозабезпечення забезпечують наступні важливі показники:

- зменшення енергоспоживання;
- плавний пуск та зупинку без гідроударів;
- зниження зношування механічних вузлів;
- стабілізацію тиску в мережі.

Крім того, впровадження автоматизованих систем керування на базі ЧРП створює передумови для цифровізації насосних станцій [11] та інтеграції їх у «розумні» енергетичні мережі.

Особливу увагу науковців і практиків останнім часом привертають комбіновані схеми регулювання, що поєднують роботу насосів із частотним перетворювачем та традиційних агрегатів у фіксованому режимі. Це дозволяє досягти оптимального співвідношення між вартістю модернізації та економічним ефектом, забезпечуючи максимальну енергоощадність у режимах при змінному навантаженні.

Незважаючи на значну кількість досліджень, актуальним залишається комплексний підхід до модернізації електроприводів насосних установок. Він має включати: вибір оптимальних типів електродвигунів; застосування ефективних методів регулювання; розробку схем керування та систем захисту; аналіз режимів роботи; оцінку економічної доцільності.

Мета дослідження – підвищення енергоефективності, надійності та керованості насосної установки шляхом модернізації її електропривода із використанням частотно-регульованих систем та вдосконаленого автоматизованого керування.

Матеріал і результат досліджень. Модернізація насосної установки типу K200–50 [12] із застосуванням частотно-регульованого електропривода (виробництва Siemens) дала змогу суттєво знизити споживання електроенергії при одночасному збереженні стабільного тиску в розподільній мережі. Для підтвердження ефективності було виконано розрахунки на основі математичного моделювання з використанням законів подібності:

$$\frac{Q_0}{Q_1} = \frac{n_0}{n_1}, \frac{H_0}{H_1} = \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2, \frac{N_0}{N_1} = \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^3$$

де Q – подача води; H – напір води; n – частота обертання; N – споживана потужність.

Аналіз добових режимів роботи показав, що зниження частоти обертання на 15 % призводить до зменшення ККД не більш як на 1,5 %, що підтверджує доцільність частотного регулювання. Результати експериментальних вимірювань енергоємності протягом доби свідчать про значний потенціал економії.

Згідно з таблицею 1, мінімальне значення питомої енергоємності спостерігалось в години пікового водоспоживання 0,122 кВт·год/м³ (при Q – 120 м³/год, t = 13 год), тоді як у нічні періоди при малих витратах цей показник зростає у кілька разів.

Графік добової зміни питомої енергоємності (рис. 1) наочно демонструє коливання навантаження та підтверджує адаптивність системи до змінних умов експлуатації.

Отримані результати свідчать, що навіть використання частотного регулювання для окремих агрегатів позитивно впливає на загальну ефективність системи, зменшує зношування обладнання та підвищує якість керування.

У ході дослідження було випробувано також комбіновану схему регулювання з двома насосними агрегатами типу КМ 100–80–160, де один працював під керуванням частотного перетворювача, а другий – у постійному режимі. Такий підхід дозволив об'єднати переваги частотного та традиційного регулювання, забезпечивши оптимальний баланс між енергозбереженням і стабільністю тиску в системі.

Розрахункові дані для насосної станції при напорі H = 30 м наведені в таблиці 2. Вони показують зміну продуктивності, потужності електродвигунів та питомої енергоємності (ЕЕ) залежно від часу доби. Мінімальні значення питомих витрат енергії досягали 0,09–0,095 кВт·год/м³ у години пікового навантаження (12–13-та година), тоді як у нічний час вони зростали до 0,36–0,435 кВт·год/м³ через зниження обсягів подачі. Середнє значення питомої енергоємності для всієї доби становило близько 0,17–0,18 кВт·год/м³, що є мінімальним серед усіх розглянутих варіантів регулювання.

Комбінована схема регулювання має низку беззаперечних переваг: скорочення енергоспоживання у нічний час за рахунок відключення

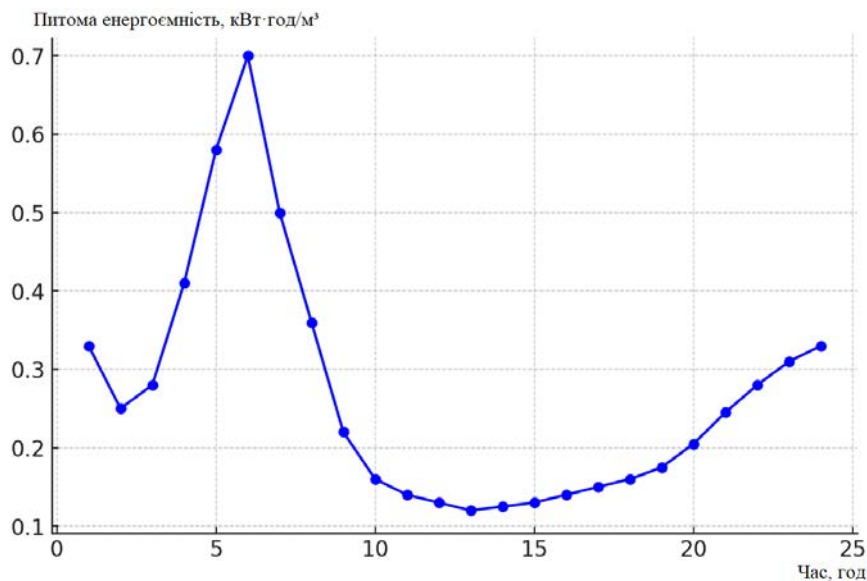


Рис. 1. Залежність питомої енергосмістності насосної станції від часу доби

Таблиця 1

Споживання електроенергії та питома енергосмістність насосної станції при частотному регулюванні

t, год	Q, м³/год	H, м	$\eta_{\text{відн}}$	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м³
1	20	30	0,87	6,6	0,33
2	30	30	0,88	7,4	0,247
3	25	30	0,87	7,0	0,28
4	15	30	0,86	6,2	0,413
5	10	30	0,86	5,8	0,58
6	8	30	0,86	5,64	0,705
7	12	30	0,86	5,96	0,497
8	18	30	0,86	6,44	0,358
9	35	30	0,88	7,8	0,223
10	60	30	0,9	9,8	0,163
11	80	30	0,92	11,4	0,143
12	100	30	0,93	13,0	0,13
13	120	30	0,95	14,6	0,122
14	110	30	0,94	13,8	0,125
15	90	30	0,92	12,2	0,136
16	85	30	0,92	11,8	0,139
17	70	30	0,91	10,6	0,151
18	65	30	0,9	10,2	0,157
19	50	30	0,89	9,0	0,18
20	40	30	0,88	8,2	0,205
21	30	30	0,88	7,4	0,247
22	25	30	0,87	7,0	0,28
23	22	30	0,87	6,76	0,307
24	20	30	0,87	6,6	0,33

Таблиця 2

Розрахункові дані для насосної станції при комбінованому регулюванні, H=30 м

t, год	Q, м³/год	n, шт	$\eta_{\text{відн}}$	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м³
1	25	1	0,91	6,0	0,24
2	40	1	0,91	6,9	0,173
3	35	1	0,91	6,6	0,189
4	20	1	0,91	5,7	0,285
5	15	1	0,9	5,4	0,36
6	12	1	0,9	5,22	0,435
7	18	1	0,91	5,58	0,31
8	25	1	0,91	6,0	0,24
9	50	1	0,92	7,5	0,15
10	80	1	0,93	9,3	0,116
11	100	2	0,93	10,5	0,105
12	130	2	0,94	12,3	0,095
13	150	2	0,95	13,5	0,09
14	140	2	0,95	12,9	0,092
15	120	2	0,94	11,7	0,097
16	110	2	0,94	11,1	0,101
17	90	2	0,93	9,9	0,11
18	85	2	0,93	9,6	0,113
19	70	1	0,92	8,7	0,124
20	60	1	0,92	8,1	0,135
21	45	1	0,92	7,2	0,16
22	35	1	0,91	6,6	0,189
23	30	1	0,91	6,3	0,21
24	28	1	0,91	6,18	0,221

надлишкових агрегатів; підтримання стабільного тиску в мережі незалежно від змін водоспоживання; зменшення пускових струмів і зниження ризику гідравлічних ударів; підвищення надійності та довговічності насосного обладнання.

На основі отриманих експериментальних результатів зроблена порівняльна оцінка досліджених режимів регулювання (табл. 3).

Обговорення. В Україні останніми роками проведено ряд досліджень, спрямованих на підвищення енергоефективності насосних установок у комунальному господарстві та агропромисловому комплексі. У роботі [4] обґрунтовано раціональні параметри електроприводів насосних агрегатів для систем АПК. Автори доводять, що правильний вибір режимів роботи та параметрів двигунів може зменшити енерговитрати на 20–25 %, однак дослідження обмежується використанням частотного регулювання без комбінування з іншими методами.

У дослідженні [10] розглянуто ефективність електропривода відцентрового насосного агрегату у виробничих умовах. Результати показали можливість зниження енергоспоживання на 18–22 % у порівнянні з нерегульованим приводом, проте коливання питомої енергоємності залишаються значними у нічні години. Подібні висновки роблять автори роботи [7], які у навчально-методичних матеріалах підкреслюють переваги автоматизованого електропривода, але не розглядають його поєднання з комбінованими схемами керування.

Практичний досвід модернізації насосних агрегатів цукрових заводів наведений в роботі [11]. Автори відзначають, що використання екс-

прес-діагностики та частотно-регульованого привода дозволяє знизити витрати електроенергії до 30 % і зменшити зношування обладнання, однак енергетичний ефект виявляється нижчим за результати комбінованого регулювання.

Таким чином, проведене дослідження значно розширює існуючі вітчизняні підходи. Якщо у більшості праць [4; 7; 10; 11] частотне регулювання розглядається як універсальний метод, то запропонована у цій статті комбінована схема доводить вищу ефективність (до 60 % енергозбереження) і водночас забезпечує стабільність тиску та зниження динамічних навантажень. Це підтверджує її перспективність для широкого впровадження у вітчизняних системах водопостачання та на підприємствах агропромислового комплексу.

Висновки. На основі проведених експериментальних досліджень та порівняльної оцінки різних режимів регулювання роботи насосних електроприводів можна зробити такі узагальнення:

1. Базовий режим без регулювання характеризується найвищими питомими витратами енергії, що в середньому сягають $\sim 0,45$ кВт·год/м³. У нічний час доби значення питомої енергоємності перевищує 1,0 кВт·год/м³, що свідчить про вкрай низьку енергоефективність та значні перевитрати електроенергії. Крім того, робота нерегульованих асинхронних двигунів супроводжується високими пусковими струмами, гідравлічними ударами та прискореним зношуванням обладнання.

2. Частотне регулювання дозволило знизити середнє значення питомої енергоємності до 0,32 кВт·год/м³, що відповідає економії до 30 %

Таблиця 3

Порівняльна оцінка ефективності різних режимів регулювання

Параметр	Регулювання		
	без	частотне	комбіноване
Середня питома енергоємність, кВт·год/м ³	$\sim 0,45$	0,32	0,12
Мінімальна питома енергоємність, кВт·год/м ³	0,30-0,35	0,122	0,09
Максимальна питома енергоємність, кВт·год/м ³	> 1,0 (в нічні години)	0,705 (t=6год, Q=8 м ³ /год)	0,435 (t=6год, Q=8 м ³ /год)
Енергозбереження порівняно з базовим станом	-	до 30%	до 60%
Стабільність тиску в мережі	Незадовільна	задовільна	висока
Адаптивність до зміни навантаження	Низька	середня	висока
Пускові струми та гідравлічні удари	високі	знижені	мінімальні
Надійність та довговічність	низька	підвищена	максимальна

електроенергії у порівнянні з базовим режимом. Мінімальне значення цього показника становило 0,122 кВт·год/м³, тоді як максимальне – 0,705 кВт·год/м³. Такий підхід забезпечує задовільну стабільність тиску та середній рівень адаптивності до змін водоспоживання.

3. Комбіноване регулювання, що поєднує роботу одного насоса під керуванням частотного перетворювача та іншого в постійному режимі, виявилось найбільш ефективним. Середнє значення питомої енергоємності знизилось до 0,12 кВт·год/м³, а мінімальне – до 0,09 кВт·год/м³. Це відповідає енергозбереженню до 60 % у порівнянні з роботою без регулювання. Максимальне значення питомої енергоємності у нічний час становило лише 0,435 кВт·год/м³, що більш ніж удвічі менше, ніж при застосуванні лише частотного регулювання.

4. Застосування комбінованої схеми також забезпечує найвищий рівень стабільності тиску в мережі, максимальну адаптивність до зміни навантаження, мінімальні пускові струми та гідравлічні удари, що істотно підвищує надійність і довговічність насосного обладнання.

Отже, результати дослідження однозначно підтверджують доцільність впровадження енерго-

ощадних систем керування насосними агрегатами. Частотне регулювання може вважатися базовим рішенням для підвищення енергоефективності, однак найбільш перспективним є саме комбінований підхід, який поєднує високу енергоефективність (до 60 % економії), стабільність роботи та зниження динамічних навантажень. Отримані результати мають вагомое практичне значення для модернізації насосних станцій у комунальному господарстві та агропромисловому комплексі, зменшення експлуатаційних витрат та створення передумов для подальшої цифровізації систем водопостачання.

Подальші дослідження доцільно зосередити на таких напрямках: цифровізація насосних станцій шляхом розробки систем моніторингу на базі IoT-сенсорів, інтеграції з SCADA та хмарними платформами; застосування алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування навантаження та адаптивного регулювання роботи електроприводів у реальному часі; створення цифрових двійників насосних установок для моделювання динаміки їхньої роботи та оптимізації стратегій керування; промислові випробування у масштабах комунального господарства та агропромислового комплексу України для підтвердження енергоекономічного ефекту.

ЛІТЕРАТУРА

1. Semenov A., Kharak R., Bychkov Y., Skrypnyk V. The efficiency of the controlled electric drive in water supply pump installations. *Slovak International Scientific Journal*. 2024. № 82. P. 23–27. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.10952901>
2. Wang C., Shi W., Wang X., et al. Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics. *Applied Energy*. 2017. Vol. 187. P. 10–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.046>
3. Kandi A., Moghimi M., Tahani M., Derakhshan S. Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes. *Energy*. 2021. Vol. 217. Article ID: 119402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119402>
4. Семенов А. О., Скрипник В. О., Харак Р. М., Супрович О. С. Обґрунтування раціональних параметрів електроприводів насосних агрегатів для систем агропромислового комплексу. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: Гельветика, 2024. № 3 (496). С. 80–86.
5. Goman V., Prakht V., Kazakbaev V., Dmitrievskii V. Comparative study of energy consumption and CO₂ emissions of variable-speed electric drives with induction and synchronous reluctance motors in pump units. *Mathematics*. 2021. Vol. 9. Article ID: 2679. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9212679>
6. Resa J., Cortes D., Marquez-Rubio J. F., Navarro D. Reduction of induction motor energy consumption via variable velocity and flux references. *Electronics*. 2019. Vol. 8. Article ID: 740. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8070740>
7. Павленко Т. П., Донець О. В., Петренко О. М. Автоматизований електропривод загальнопромислових механізмів: конспект лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. 132 с.
8. Hieninger T., Schmidt-Vollus R., Schlücker E. Improving energy efficiency of individual centrifugal pump systems using model-free and on-line optimization methods. *Applied Energy*. 2021. Vol. 304. Article ID: 117311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117311>
9. Lavrič H., Drobníč K., Fišer R. Model-based assessment of energy efficiency in industrial pump systems: a case study approach. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 22. Article ID: 10430. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210430>
10. Moshnoriz M., Tkachuk A., Moshnoriz M., Gribovskij O. Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15, № 4. P. 94–105. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.94>
11. Семенов А. О., Семенова Н. В. Підвищення ефективності насосів для перекачування пульпи цукрових заводів з використанням експрес-діагностики. *Проблеми та перспективи розвитку сільськогосподарського машинобудування: матеріали V Всеукр. наук.-практ. Інтернет-конференції (м. Полтава, 21–22 лютого 2023 р.)*. Полтава: ПДАУ, 2023. С. 153–157.
12. Konsolnik. Насоси консольні К, КМ: Насос К80-50-200. URL: <https://konsolnik.com.ua/uk/nasosy-konsolni-k-km/nasos-k80-50-200/> (дата звернення: 14.08.2025).

RATIONAL OPERATING MODES OF PUMP ELECTRIC DRIVES: EFFICIENCY STUDY OF FREQUENCY AND COMBINED CONTROL

Anatolii Semenov

Candidate) of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Mechanical and Electrical Engineering,

Poltava State Agrarian University, 1/3 Skovorody str., Poltava, Ukraine, 36003, asemen2015@gmail.com.ua

ORCID: 0000-0003-3184-6925

Nataliia Semenova

Head of the Department of Marketing

Poltava Foundry-Mechanical Plant, 12 Lyvarna str., Poltava, Ukraine, 36034, nvsemenova78@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4495-7712

The problem of improving the energy efficiency of pumping installations in water supply systems is one of the key tasks of modern energy engineering, since these installations are among the largest electricity consumers in industry and municipal services. Rising energy costs and global trends toward the implementation of energy-saving technologies determine the relevance of research in this field. Analysis shows that most pumping stations in Ukraine operate on the basis of unregulated induction motors with direct-on-line starting, which leads to excessive electricity consumption, hydraulic shocks, increased starting currents, and a reduction in equipment lifetime. Traditional flow control methods (throttling, step control) do not meet modern energy efficiency requirements and need to be replaced. Purpose. The research aims to improve the efficiency of pump electric drives by optimizing operating modes through the application of frequency and combined control. Methodology. A comprehensive approach was applied, including analytical calculations of energy consumption, mathematical modeling based on similarity laws, and experimental verification of the results on operating installations. Energy and techno-economic indicators were used to evaluate efficiency. Scientific novelty. For the first time, rational operating modes of pump electric drives under variable water consumption conditions have been substantiated using a combined control scheme that integrates frequency-controlled and unregulated operation. It has been proven that such a scheme ensures: reduction of specific energy consumption to 0.09–0.12 kWh/m³ (which is 60% lower compared to traditional modes); improvement of system pressure stability and reduction of dynamic loads; creation of technical prerequisites for the integration of pumping stations into digital monitoring and control systems. Results. It was found that the use of frequency control reduces the specific energy consumption to 0.32 kWh/m³, and during peak water consumption hours – to 0.122 kWh/m³. The combined scheme with two pumping units demonstrated even higher efficiency, with an average specific energy consumption of 0.12 kWh/m³, which ensures up to 60% energy savings compared to traditional systems. Practical value. The developed recommendations can be applied in the modernization of pumping stations in municipal services and the agro-industrial sector. This will reduce operating costs, improve pressure stability, extend equipment lifetime, and create prerequisites for the digitalization of water supply systems.

Key words: electric drive, frequency control, combined control, energy efficiency, water supply, agro-industrial complex.

REFERENCES

1. Semenov, A., Kharak, R., Bychkov, Y., & Skrypnyk, V. (2024). The efficiency of the controlled electric drive in water supply pump installations. *Slovak International Scientific Journal*, 82, 23–27. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10952901>
2. Wang, C., Shi, W., Wang, X., et al. (2017). Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics. *Applied Energy*, 187, 10–26. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.046>
3. Kandi, A., Moghimi, M., Tahani, M., & Derakhshan, S. (2021). Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes. *Energy*, 217, Article 119402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119402>
4. Semenov, A. O., Skrypnyk, V. O., Kharak, R. M., & Suprovych, O. S. (2024). Obgruntuvannia ratsionalnykh parametrov elektropyvodiv nasosnykh ahrehativ dlia system ahropromyslovoho kompleksu [Justification of rational parameters of electric drives for pump units for agro-industrial complex systems]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK – Collection of Scientific Works of the National University of Shipbuilding*, 3(496), 80–86. [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).12](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).12) [in Ukrainian]
5. Goman, V., Prakht, V., Kazakbaev, V., & Dmitrievskii, V. (2021). Comparative study of energy consumption and CO₂ emissions of variable-speed electric drives with induction and synchronous reluctance motors in pump units. *Mathematics*, 9, Article 2679. <https://doi.org/10.3390/math9212679>

6. Resa, J., Cortes, D., Marquez-Rubio, J. F., & Navarro, D. (2019). Reduction of induction motor energy consumption via variable velocity and flux references. *Electronics*, 8, Article 740. <https://doi.org/10.3390/electronics8070740>
7. Pavlenko, T. P., Donets, O. V., & Petrenko, O. M. (2018). *Avtomatyzovanyi elektropryvod zahalnopromyslovykh mekhanizmiv: konspekt lektsii* [Automated electric drive of general industrial mechanisms: Lecture notes]. Kharkiv: KhNUMG im. O. M. Beketova. [in Ukrainian]
8. Hieninger, T., Schmidt-Vollus, R., & Schlücker, E. (2021). Improving energy efficiency of individual centrifugal pump systems using model-free and on-line optimization methods. *Applied Energy*, 304, Article 117311. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117311>
9. Lavrič, H., Drobnič, K., & Fišer, R. (2024). Model-based assessment of energy efficiency in industrial pump systems: A case study approach. *Applied Sciences*, 14(22), Article 10430. <https://doi.org/10.3390/app142210430>
10. Moshnoriz, M., Tkachuk, A., Moshnoriz, M., & Gribovskij, O. (2024). Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit. *Machinery & Energetics*, 15(4), 94–105. <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.94>
11. Semenov, A. O., & Semenova, N. V. (2023). Pidvyshchennia efektyvnosti nasosiv dlia perekachuvannia pulpy tsukrovykh zavodiv z vykorystanniam ekspres-diahnostyky [Improving the efficiency of pumps for pumping sugar factory pulp using express diagnostics]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku silskohospodarskoho mashynobuduvannia: materialy V Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi Internet-konferentsii* (pp. 153–157). Poltava: PDAU. [in Ukrainian]
12. Konsolnik. (2025, August 14). *Nasosy konsolni K, KM: Nasos K80-50-200* [Cantilever pumps K, KM: Pump K80-50-200]. <https://konsolnik.com.ua/uk/nasosy-konsolnik-km/nasos-k80-50-200/> [in Ukrainian]



Стаття надійшла 25.07.2025
Стаття прийнята 18.08.2025
Опубліковано 29.09.2025