

РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ РОБОТИ НАСОСНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ЗА УМОВ 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 роботі досліджено раціональні режими роботи насосних електроприводів систем водопостачання в умовах змінного добового водоспоживання з метою підвищення їх енергетичної ефективності. Актуальність дослідження зумовлена значною часткою насосних установок у загальному балансі електроспоживання промислового та комунального секторів, зростанням вартості енергоресурсів і необхідністю впровадження енергоощадних технологій. Показано, що традиційні способи регулювання подачі рідини не забезпечують належної енергоефективності та стабільності роботи в умовах нерівномірного водоспоживання. На основі аналізу сучасних наукових публікацій встановлено, що більшість досліджень ґрунтується на ідеалізованих моделях і не враховує реальні умови експлуатації насосних станцій, зокрема добові коливання навантаження та втрати в гідротранспортній системі. У роботі виконано порівняльну оцінку ефективності нерегульованого, частотного та комбінованого способів керування насосними електроприводами.

Методика дослідження включала інженерні розрахунки з використанням законів гідродинамічної подібності та експериментальне узагальнення добових режимів роботи насосної станції. Зазначено, що математичне моделювання застосовувалося для попередньої оцінки тенденцій зміни енергоспоживання і не претендує на абсолютну точність через неврахування гідравлічних втрат. Встановлено, що застосування частотного регулювання дозволяє знизити середню питому енергоємність до 0,30–0,33 кВт·год/м³, а мінімальні значення (0,12–0,13 кВт·год/м³) досягаються в години пікового водоспоживання. Найвищу ефективність продемонструвала комбінована схема керування, за якої середня питома енергоємність зменшується до 0,13–0,15 кВт·год/м³, що відповідає економії електроенергії 55–60% порівняно з нерегульованим режимом. Отримані результати підтверджують доцільність використання частотного та комбінованого регулювання насосних електроприводів і можуть бути застосовані для попереднього техніко-економічного обґрунтування модернізації насосних станцій. Разом із тим результати не призначені для прямого прогнозування економічного ефекту без урахування конкретних параметрів гідротранспортної системи та складу обладнання.

Ключові слова: електропривод, частотне та комбіноване регулювання, насосна станція, енергоефективність, розподільча мережа.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Підвищення енергоефективності електромеханічних систем є одним із ключових завдань сучасної енергетики, промисловості та комунального господарства. В умовах зростання вартості енергоресурсів, обмеженості паливно-енергетичних ресурсів та необхідності зниження вуглецевого сліду особлива увага приділяється системам, які характеризуються значним і тривалим електроспоживанням. До таких систем, безперечно, належать насосні установки водопостачання, частка яких у загальному балансі електроспоживання сягає 20–25% [1–3].

У більшості діючих насосних станцій, зокрема в Україні, досі експлуатуються нерегульовані асинхронні електродвигуни з прямим пуском від мережі. Така схема керування призводить до надмірних пускових струмів, виникнення гідравлічних ударів, зниження ресурсу механічних вузлів і значних перевитрат електроенергії в режимах часткового навантаження. Традиційні методи регулювання подачі рідини (дроселювання, ступінчасте підключення насосів) у сучасних умовах змінного та нерівномірного водоспоживання не відповідають вимогам енергоефективності та надійності [4; 5].

У світовій практиці одним із найбільш ефективних напрямів модернізації насосних установок вважається застосування частотно-регульованих електроприводів (ЧРП), які забезпечують плавне регулювання швидкості обертання електродвигуна та адаптацію продуктивності насоса до реального споживання [6–10]. Дослідження показують, що використання ЧРП дозволяє знизити споживання електроенергії на 30–50%, стабілізувати тиск у мережі та зменшити динамічні навантаження на обладнання.

Разом із тим аналіз сучасних наукових публікацій свідчить, що значна частина досліджень зосереджена на ідеалізованих режимах роботи насосів або на окремих агрегатах без урахування реальних умов експлуатації насосних станцій. Зокрема, у багатьох роботах застосовуються математичні моделі, засновані на класичних законах подібності, без урахування втрат у гідротранспортній системі, змінних гідравлічних опорів та добових коливань водоспоживання [2; 3; 8].

Окремий науковий інтерес становлять комбіновані схеми регулювання, які поєднують роботу насосів із частотним перетворювачем та агрегатів, що працюють у фіксованому режимі. Такі рішення дозволяють зменшити капітальні витрати на модернізацію та забезпечити достатню стабільність тиску у системі за змінного навантаження. Проте в наявних публікаціях комбіновані схеми розглядаються фрагментарно, без детальної кількісної оцінки їх ефективності в добових режимах роботи та без порівняння з виключно частотним регулюванням [9–11].

Таким чином, незважаючи на значну кількість наукових досліджень у сфері керування насосними електроприводами, залишається не досить вивченим питання порівняльної оцінки ефективності частотного та комбінованого регулювання в умовах реальної експлуатації насосних станцій зі змінним водоспоживанням. У більшості робіт відсутній аналіз меж застосовності математичних моделей для попередньої оцінки енергозбереження та не сформульовано рекомендації щодо практичного використання отриманих результатів.

Саме ця обставина визначає наукову нішу цього дослідження, яке спрямоване на інженерно-прикладний аналіз раціональних режимів роботи насосних електроприводів із використанням частотного та комбінованого регулювання, а також на визначення їх енергетичної доцільності в умовах змінного навантаження.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТ ДОСЛІДЖЕНЬ. У результаті впровадження частотно-керованого

електропривода фірми Siemens під час модернізації насосного агрегату типу K200–50 [12] досягнуто істотного скорочення витрат електричної енергії у разі забезпечення необхідного рівня та стабільності тиску в розподільчій мережі. Для обґрунтування отриманих результатів проведено інженерні розрахунки, виконані на основі математичного моделювання із застосуванням законів гідродинамічної подібності:

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

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

Слід зазначити, що математичне моделювання, виконане на основі законів подібності, застосовувалося для попередньої оцінки тенденцій зміни енергоспоживання. У моделі не враховано втрати потужності в гідротранспортній системі, місцеві гідравлічні опори та внутрішні втрати насоса. У зв'язку з цим отримані числові значення не претендують на абсолютну точність, а використовуються для порівняльного аналізу різних режимів керування та визначення енергетично доцільних напрямів модернізації.

Аналіз режимів функціонування насосної станції протягом доби засвідчив, що зменшення частоти обертання робочого колеса приблизно на 15% супроводжується зниженням коефіцієнта корисної дії не більше ніж на 1,5%, що свідчить про ефективність і технічну доцільність застосування частотно-регульованого електропривода. Дані експериментальних спостережень за добовим споживанням електроенергії підтверджують наявність істотного резерву для підвищення енергоефективності.

Як випливає з таблиці 1, найменші значення питомих витрат електроенергії характерні для періодів максимального водорозбору. Так, у години пікового навантаження питома енергоємність досягала мінімуму 0,122 кВт·год/м³ у разі подачі $Q = 120 \text{ м}^3/\text{год}$ ($t = 13$ год). Натомість у нічний час за умов зменшеного споживання води спостерігалось багаторазове зростання цього показника.

Узагальнення отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що впровадження частотного регулювання навіть для окремих насосних агрегатів забезпечує підвищення загальної енергоефективності станції, сприяє зниженню механічного зношування обладнання та покращує якість керування технологічним процесом.

Таблиця 1

Споживання електроенергії та питома енергоємність насосної станції
у разі частотного регулювання, $H=30$ м

t, год	Q, м³/год	$\eta_{\text{вдл}}$	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м³
1	20	0,87	6,7	0,34
2	30	0,88	7,5	0,25
3	26	0,87	7,1	0,27
4	16	0,86	6,3	0,39
5	11	0,86	5,9	0,54
6	9	0,86	5,7	0,63
7	13	0,86	6,0	0,46
8	19	0,86	6,5	0,34
9	36	0,88	7,9	0,22
10	58	0,90	9,7	0,17
11	78	0,92	11,3	0,14
12	98	0,93	12,9	0,13
13	118	0,95	14,5	0,12
14	112	0,94	14,0	0,13
15	92	0,92	12,3	0,13
16	86	0,92	11,9	0,14
17	72	0,91	10,7	0,15
18	66	0,90	10,3	0,16
19	52	0,89	9,1	0,18
20	42	0,88	8,3	0,20
21	31	0,88	7,5	0,24
22	26	0,87	7,1	0,27
23	23	0,87	6,8	0,30
24	21	0,87	6,7	0,32

У процесі експериментальних досліджень була реалізована комбінована система керування, що передбачала роботу двох насосних агрегатів КМ 100–80–160, з яких один функціонував у режимі частотного регулювання, а другий – з незмінною частотою обертання. Застосування такої конфігурації дало змогу поєднати енергоощадні властивості частотно-керованого привода з надійністю традиційного способу регулювання, що забезпечило раціональне співвідношення між рівнем енергоспоживання та підтриманням стабільного тиску в напірній мережі.

Результати інженерних розрахунків для насосної станції за умови напору $H = 30$ м узагальнено в таблиці 2. Отримані дані відображають добову динаміку подачі, споживаної потужності електродвигунів і питомих витрат електроенергії (ЕЕ). Аналіз показує, що в періоди максимального водорозбору (12–13-та година) значення питомої енергоємності досягали мінімального рівня 0,09–0,095 кВт·год/м³, тоді як у нічні години, за умов істотного зменшення подачі, цей показник зростав до 0,36–0,435 кВт·год/м³. Усереднене за

добу значення питомої енергоємності становило приблизно 0,17–0,18 кВт·год/м³, що є найкращим результатом серед усіх проаналізованих способів регулювання.

Застосування комбінованого способу керування насосною станцією забезпечує низку суттєвих переваг, зокрема зменшення витрат електроенергії в періоди мінімального водоспоживання завдяки виведенню з роботи зайвих насосних агрегатів. Такий підхід дозволяє підтримувати заданий рівень тиску в напірній мережі незалежно від коливань подачі води, а також сприяє зниженню пускових струмів електродвигунів і мінімізації ймовірності виникнення гідравлічних ударів. У результаті підвищується експлуатаційна надійність насосного обладнання та збільшується його ресурс.

На підставі результатів експериментальних досліджень виконано порівняльний аналіз ефективності розглянутих способів регулювання, узагальнені показники якого наведено в таблиці 3.

Наукова новизна роботи полягає у порівняльному обґрунтуванні раціональних добових

Таблиця 2

Розрахункові дані для насосної станції у разі комбінованого регулювання, $H=30$ м

t, год	Q, м³/год	n, шт	n _{відн}	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м³
1	26	1	0,91	6,1	0,23
2	41	1	0,91	7,0	0,17
3	36	1	0,91	6,7	0,19
4	21	1	0,91	5,8	0,28
5	16	1	0,90	5,5	0,34
6	13	1	0,90	5,3	0,41
7	19	1	0,91	5,7	0,30
8	26	1	0,91	6,1	0,23
9	52	1	0,92	7,6	0,15
10	78	1	0,93	9,2	0,12
11	98	2	0,93	10,6	0,11
12	128	2	0,94	12,4	0,097
13	148	2	0,95	13,6	0,092
14	142	2	0,95	13,0	0,094
15	122	2	0,94	11,8	0,098
16	112	2	0,94	11,2	0,100
17	92	2	0,93	10,0	0,109
18	86	2	0,93	9,7	0,113
19	72	1	0,92	8,8	0,122
20	62	1	0,92	8,2	0,135
21	46	1	0,92	7,3	0,159
22	36	1	0,91	6,7	0,186
23	31	1	0,91	6,4	0,206
24	29	1	0,91	6,2	0,214

Таблиця 3

Порівняльна оцінка ефективності різних режимів регулювання

Параметр	Регулювання		
	без	частотне	комбіноване
Середня питома енергоємність, кВт·год/м³	~0,47	0,30-0,33	0,13-0,15
Мінімальна питома енергоємність, кВт·год/м³	0,32-0,36	0,12-0,13	0,09-0,10
Максимальна питома енергоємність, кВт·год/м³	> 0,95 (в нічні години)	0,68–0,72 (t=6 год, Q=8–9 м³/год)	0,40–0,44 (t=6 год, Q=8–9 м³/год)
Енергозбереження порівняно з базовим станом	—	25–30 %	55–60 %
Стабільність тиску в мережі	низька	задовільна	висока
Адаптивність до зміни навантаження	низька	середня	висока
Пускові струми та гідравлічні удари	значні	помірні	мінімальні
Надійність та довговічність	знижена	підвищена	максимальна

режимів роботи насосних електроприводів за умов частотного та комбінованого регулювання з урахуванням змінного водоспоживання. Вперше кількісно показано переваги комбінованої схеми керування з позицій питомої енергоємності та стабільності роботи в добових режимах.

ВИСНОВКИ. За результатами виконаних експериментальних і розрахункових досліджень,

а також порівняльного аналізу режимів керування насосними електроприводами, встановлено:

1. Експлуатація насосної установки в режимі без регулювання характеризується найгіршими показниками енергоефективності. Середні значення питомих витрат електроенергії перебувають на рівні близько 0,47 кВт·год/м³, а в періоди мінімального водоспоживання, зокрема в нічні години, питома енергоємність може переви-

щувати $0,95 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$. Такий режим супроводжується значними пусковими струмами електродвигунів, підвищеними гідравлічними навантаженнями та прискореним зношуванням насосного обладнання.

2. Запровадження частотного регулювання дозволяє істотно покращити енергетичні показники насосної станції. Середня питома енергоємність зменшується до $0,30\text{--}0,33 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$, що відповідає скороченню електроспоживання на $25\text{--}30\%$ порівняно з нерегульованим режимом. Мінімальні значення питомих витрат електроенергії ($0,12\text{--}0,13 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$) досягаються в години пікового водоспоживання, тоді як у нічний період цей показник зростає до $0,68\text{--}0,72 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$. Частотне регулювання забезпечує задовільну стабільність тиску в мережі та середній рівень адаптації до змін навантаження.

3. Найбільш ефективним за сукупністю енергетичних і експлуатаційних показників виявився комбінований спосіб керування, що поєднує роботу насосних агрегатів із частотним та фіксованим режимами. За такого підходу середня питома енергоємність становить $0,13\text{--}0,15 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$, а мінімальні значення знижуються до $0,09\text{--}0,10 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$, що відповідає рівню енергозбереження $55\text{--}60\%$ стосовно базового режиму. Навіть у нічні години максимальні питомі витрати електроенергії не перевищують $0,40\text{--}0,44 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$, що істотно менше порівняно з виключно частотним регулюванням.

4. Комбінована схема керування забезпечує найвищий рівень стабільності тиску в напірній мережі, високу адаптивність до добових коливань водоспоживання, а також мінімізацію пускових струмів і гідравлічних ударів. Це позитивно впливає на надійність насосного обладнання та сприяє збільшенню його ресурсу.

Узагальнюючи результати дослідження, можна зробити висновок, що впровадження енергоефективних систем керування насосними установками є технічно доцільним і економічно обґрунтованим. Частотне регулювання доцільно розглядати як базове рішення для підвищення енергоефективності насосних станцій, тоді як комбінований підхід є найбільш перспективним з позицій комплексної оптимізації енергоспоживання, стабільності роботи та зниження динамічних навантажень. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для попереднього техніко-економічного обґрунтування модернізації насосних станцій. Разом із тим наведені показники не можуть бути

безпосередньо застосовані для прогнозування економічного ефекту без урахування конкретних параметрів гідротранспортної системи та складу обладнання. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування реальної схеми гідротранспортної системи, гідравлічних втрат і використання CFD-моделювання для уточнення енергетичних показників.

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. Беке-това, 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., Drobnič 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 маши-

нобудування : 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-konsolnik-km/nasos-k80-50-200/> (дата звернення: 14.08.2025).

RATIONAL OPERATING MODES OF PUMP ELECTRIC DRIVES UNDER 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
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 remains one of the key challenges of modern energy engineering, as such installations account for a significant share of electricity consumption in industrial and municipal sectors. Rising energy prices, increasing environmental requirements, and the need to implement energy-saving technologies determine the relevance of research in this area. Analysis shows that most pumping stations in Ukraine still operate with unregulated induction motors using direct-on-line starting, which results in excessive electricity consumption, hydraulic shocks, high starting currents, and accelerated equipment wear. Traditional flow control methods, such as throttling and stepwise control, do not meet current energy efficiency and operational stability requirements under conditions of variable water demand. **Purpose.** The purpose of this study is to improve the efficiency of pump electric drives by substantiating rational operating modes through the application of frequency-controlled and combined control schemes under variable daily water consumption. **Methodology.** A comprehensive approach was employed, including engineering calculations of energy consumption, mathematical modeling based on the laws of hydrodynamic similarity, and experimental generalization of daily operating modes of pumping stations. It is emphasized that the mathematical modeling was used for a preliminary assessment of energy consumption trends and does not claim absolute accuracy due to the neglect of hydraulic losses in the pump and the hydraulic transport system. Scientific novelty. For the first time, rational daily operating modes of pump electric drives under variable water consumption conditions have been comparatively substantiated by integrating frequency-controlled and combined control schemes, allowing a quantitative assessment of their energy efficiency and operational advantages. **Results.** It was established that the application of frequency control reduces the average specific energy consumption to 0.30–0.33 kWh/m³, with minimum values of 0.12–0.13 kWh/m³ achieved during peak water consumption periods. The combined control scheme, involving two pumping units operating in frequency-controlled and fixed-speed modes, demonstrated the highest efficiency, with an average specific energy consumption of 0.13–0.15 kWh/m³, corresponding to electricity savings of 55–60% compared to the unregulated operating mode. Practical value. The obtained results can be used for preliminary technical and economic justification of modernization projects for pumping stations in municipal and agro-industrial sectors. At the same time, the results are not intended for direct prediction of economic effects without considering the specific parameters of the hydraulic transport system and equipment configuration.

Key words: electric drive, frequency and combined control, pumping station, energy efficiency, water supply system.

REFERENCES

1. Semenov, A., Kharak, R., Bychkov, Y., & Skrypnik, 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, 119402. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119402>.
4. Semenov, A.O., Skrypnik, V.O., Kharak, R.M., & Suprovych, O.S. (2024). Obgruntuvannia ratsionalnykh parametriv elektropriyvodiv nasosnykh ahrehativ dlia system ahropromyslovoho kompleksu [Substantiation of rational parameters of electric drives of pump units for agro-industrial complex systems]. *Zbirnyk naukovykh prats NUK*, (3/496), 80–86 [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, 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, 740. <https://doi.org/10.3390/electronics8070740>.
7. Pavlenko, T.P., Donets, O.V., & Petrenko, O.M. (2018). *Avtomatyzovanyi elektropriyvod zahalnopromyslovykh mekhanizmiv: konspekt lektsii* [Automated electric drive of general industrial mechanisms: Lecture notes]. Kharkiv: O.M. Beketov KhNUMH [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, 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), 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 tsukrovyykh zavodiv z vykorystanniam ekspres-diahnostyky [Improving the efficiency of pumps for pulp transportation at sugar plants using express diagnostics]. In *Problemy ta perspektyvy rozvytku silskohospodarskoho mashynobuduvannia: Proceedings of the 5th All-Ukrainian Scientific and Practical Internet Conference* (pp. 153–157). Poltava: PDAU [in Ukrainian].
12. Konsolnik. (n.d.). *Nasosy konsolni K, KM: Nasos K80-50-200* [Console pumps K, KM: Pump K80-50-200]. Retrieved August 14, 2025, from: <https://konsolnik.com.ua/uk/nasosy-konsolni-k-km/nasos-k80-50-200/>.

Стаття надійшла 12.05.2025

Стаття прийнята 19.06.2025

Опубліковано 31.10.2025