

СЕМЕНОВ АНАТОЛІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ ✉ – кандидат фізико-математичних наук, доцент, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>; e-mail: asemen2015@gmail.com.

СКРИПНИК ВЯЧЕСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, професор кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-7398>; e-mail: viacheslav.skrypnyk@pdau.edu.ua.

САХНО ТАМАРА ВІКТОРІВНА – доктор хімічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри біотехнології та хімії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7049-4657>; e-mail: sakhno2001@gmail.com.

БУТ АНДРІЙ ГРИГОРОВИЧ – аспірант кафедри механічної та електричної інженерії, Полтавський державний аграрний університет; м. Полтава, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4925-8313>; e-mail: andrii.h.but@pdau.edu.ua.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ НАСОСНИХ АГРЕГАТИВ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ

У статті досліджено питання підвищення енергоефективності насосних станцій шляхом модернізації їх електроприводів із застосуванням частотного та комбінованого регулювання. Актуальність проблеми обумовлена зростанням вартості енергоресурсів, підвищенням вимог до ефективності технологічних процесів, а також значною часткою електроенергії, що споживається насосним обладнанням у промисловості та комунальному господарстві. Обґрунтовано доцільність переходу від нерегульованих асинхронних електродвигунів до частотно-регульованих систем керування, що дозволяє адаптувати роботу насосів до змін водоспоживання, зменшити енергоспоживання, покращити стабільність тиску в мережі, продовжити термін служби обладнання, а також знизити витрати на технічне обслуговування та ремонт. У роботі наведено результати математичного моделювання режимів роботи насосної станції з урахуванням законів подібності та проведено аналіз добових графіків роботи для різних режимів керування. Підтверджено зниження питомої енергоємності при частотному регулюванні до 0,32 кВт·год/м³, а також ефективність комбінованої схеми керування на базі трьох насосних агрегатів, один з яких працює з частотним перетворювачем. Такий підхід забезпечив мінімальний показник питомої енергоємності – 0,06 кВт·год/м³, що відповідає до 60 % енергозбереження порівняно з традиційними схемами без регулювання. Дослідження підтвердило, що впровадження частотного та комбінованого регулювання дає змогу значно підвищити енергоефективність насосних установок в умовах змінного навантаження, зменшити гідравлічні удари, знизити пускові струми та підвищити надійність обладнання. Розроблені рекомендації можуть бути використані під час модернізації існуючих насосних станцій, планування інвестиційних проектів у сфері водопостачання, а також при впровадженні автоматизованих систем керування для промислових і муніципальних об'єктів.

Ключові слова: електропривод; насосна установка; частотне регулювання; енергоефективність; водопостачання; автоматизоване керування.

Вступ. У сучасних умовах постійного зростання вартості енергоресурсів та підвищених вимог до енергоефективності технологічних процесів особливої актуальності набуває питання енергоощадності у всіх сферах господарської діяльності. Значну частину електроенергії в країні споживає насосне обладнання, що робить його модернізацію ключовим напрямом підвищення енергетичної ефективності, так і вимогам кінцевих споживачів [1].

Насосні установки, які споживають значну частину електроенергії до 22 % [2], відіграють важливу роль у забезпеченні безперервного транспортування рідин у багатьох сферах промисловості, енергетики, сільського господарства та житлово-комунального господарства. Особливо актуальним є їх застосування у системах централізованого водопостачання, де потрібно забезпечити стабільну подачу води до споживача з урахуванням коливань навантаження протягом доби та сезону.

Більшість насосних систем в Україні досі працює з використанням нерегульованих асинхронних електродвигунів, що функціонують у фіксованому режимі та вмикаються безпосередньо з мережі. Це зумовлює суттєві енергетичні перевитрати,

прискорений знос механічних елементів і зменшення строку служби обладнання, особливо при роботі з частковим навантаженням.

Традиційні методи регулювання подачі (механічне дроселювання [3], ступінчасте керування кількістю працюючих насосів) є малоефективними, особливо в умовах добових і сезонних коливань водоспоживання. Крім того, прямий пуск електродвигунів великої потужності з мережі спричиняє високі пускові струми, які негативно впливають як на сам двигун, так і на всю енергетичну систему в цілому.

Перспективним рішенням є впровадження частотно-регульованих електроприводів (ЧРП) та автоматизованих систем керування, які дозволяють адаптувати продуктивність насосів до реального споживання в режимі реального часу, знизити пускові навантаження, зменшити енергоспоживання на 30–50 % та забезпечити більш стабільну й безпечну роботу обладнання. Сутність функціонування ЧРП полягає в зміні частоти живлення асинхронного (або іншого) електродвигуна для регулювання його швидкості обертання. Зміна частоти живлення двигуна пропорційно змінює його швидкість обертання, що



дозволяє точно керувати робочими параметрами механізму. Проте реалізація таких рішень потребує комплексного техніко-економічного обґрунтування, правильного вибору типів двигунів, схем керування та захисту, а також оцінки екологічної та економічної ефективності модернізації.

Проблема підвищення енергоефективності насосних установок шляхом модернізації їх електроприводів активно розглядається як у вітчизняних, так і в зарубіжних дослідженнях.

У працях [4, 5] наголошується, що саме насосне обладнання споживає значну частку електроенергії на промислових підприємствах, а його ефективність значною мірою визначається типом використовуваної системи електроприводу. Дослідники зазначають, що традиційні системи з прямим пуском та нерегульованим живленням спричиняють великі перевитрати енергії та зниження надійності.

Переваги впровадження ЧРП описані у роботах [4, 6], де підкреслюється їх здатність до плавного регулювання швидкості обертання насосів, зниження гідравлічних втрат та адаптації роботи обладнання до змін навантаження. Зокрема, у дослідженні [4] доведено, що використання частотних перетворювачів дозволяє знизити енергоспоживання на 30–50 %, особливо в системах з вираженою нерівномірністю водоспоживання. Крім того, вони забезпечують плавний пуск і зупинку, що мінімізує гідроудари та динамічні навантаження на обладнання.

Увага також приділяється моделюванню механічних характеристик асинхронних двигунів [7], що є важливим етапом при виборі оптимального режиму роботи електроприводу. Класичними у цій сфері вважаються праці В. Клосса, які й досі слугують основою для розрахункових методик, що застосовуються при дослідженнях [8].

Окремий напрям публікацій присвячено впливу модернізації електроприводів з врахуванням екологічних аспектів при експлуатації насосних систем. Застосування енергоощадних електроприводів сприяє не лише зниженню споживання електроенергії, а й скороченню викидів парникових газів, що є особливо актуальним з огляду на сучасну кліматичну політику та цілі сталого розвитку.

Крім того, у працях [9, 10] розглянуто техніко-економічні аспекти вибору ЧРП у системах водопостачання. Згідно з цими дослідженнями економічна ефективність модернізації досягається завдяки скороченню витрат на електроенергію, зменшенню витрат на обслуговування та продовженню терміну експлуатації обладнання.

Загалом, забезпечення точнішого прогнозування енергоспоживання насосними установками є важливим напрямом для підвищення загальної енергоефективності систем водопостачання. Проте більшість сучасних досліджень здебільшого зосереджуються на оптимізації окремих параметрів процесу перекачування та впровадженні систем керування, не враховуючи в повному обсязі вплив змін навантаження та коливань водоспоживання в реальному часі [4]. У зв'язку з обмеженістю

оперативних даних та недостатнім впровадженням інтелектуальних методів обробки сигналів, існують труднощі в забезпеченні комплексного моніторингу енергоспоживання насосної системи [11]. Наразі більшість моделей прогнозування базуються на методах, керованих даними, які умовно поділяються на лінійні та нелінійні [12]. Переважно дослідники обирають нелінійне моделювання через його вищу точність при роботі з динамічними та складними системами [13]. Так, в інших дослідженнях успішно використовуються штучні нейронні мережі, методи глибокого навчання, моделювання в CFD-середовищах (наприклад, FLUENT), а також алгоритми XGBoost та LightGBM для побудови прогнозованих моделей роботи насосів у різних режимах [14].

У нашому дослідженні ця ідея реалізована через збір добових даних про витрати, тиск і споживану потужність при роботі в частотно-регульованому та комбінованому режимах. Це дозволяє визначити енергетичні характеристики системи з високою точністю та адаптувати роботу насосних агрегатів відповідно до реальних умов. Результати доводять ефективність підходу, що базується на поєднанні фізичних моделей (законів подібності) з елементами інтелектуального управління, як основу для подальшої цифровізації систем водопостачання та впровадження систем прийняття рішень у реальному часі.

Незважаючи на значну кількість публікацій, залишається актуальним питання комплексного підходу до модернізації електроприводних систем насосних установок, що охоплює вибір двигунів, методів регулювання, схем керування, систем захисту, аналіз режимів роботи та оцінку економічного ефекту. Саме такий підхід реалізовано в даному дослідженні.

Мета дослідження. Підвищення енергоефективності, надійності та керованості насосної установки шляхом модернізації її електроприводної частини з використанням ЧРП та вдосконаленої системи автоматизованого керування.

Методи та результати дослідження. У результаті модернізації насосної установки типу Д 200–35 із використанням частотно-регульованого привода (виробництва Grundfos) було досягнуто значного зниження енергоспоживання при збереженні стабільного тиску в мережі. Проведені розрахунки, базовані на математичних моделях, підтвердили ефективність частотного регулювання відповідно до законів подібності:

$$\frac{Q_0}{Q_1} = \frac{n_0}{n_1} \quad (1)$$

$$\frac{H_0}{H_1} = \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{N_0}{N_1} = \left(\frac{n_0}{n_1}\right)^3 \quad (3)$$

де Q – витрата води;
 n – частота обертання;

H – напір;

N – споживана потужність.

Аналіз добових режимів роботи показав, що зменшення частоти обертання лише на 10 % викликає зниження ККД не більше ніж на 1 %, що є енергетично доцільним.

Вимірювання енергоємності насосної установки протягом доби підтвердили значний потенціал економії.

Згідно з табл. 1, середнє значення питомої енергоємності склало 0,32 кВт·год/м³, що є на 15–20 % нижчим у порівнянні з аналогічною установкою, яка працює без частотного регулювання (табл. 2). Найменші значення питомої енергоємності спостерігалися в періоди пікового водоспоживання (0,07–0,15 кВт·год/м³), а найвищі – в нічні години при низьких витратах (до 1,18 кВт·год/м³).

Таблиця 1 – Споживана електроенергія та енергоємність насосної станції в умовах частотного регулювання

t, год	Q, м ³ /год	H, м	пвідн	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м ³
1	62,33	30	0,84	10,92	0,17
2	156,80	30	0,85	14,14	0,09
3	40,38	30	0,84	10,31	0,25
4	16,79	30	0,84	9,71	0,57
5	12,42	30	0,85	9,60	0,77
6	7,98	30	0,85	9,49	1,18
7	14,93	30	0,84	9,66	0,64
8	14,56	30	0,84	9,65	0,66
9	40,31	30	0,84	10,31	0,25
10	52,96	30	0,84	10,66	0,20
11	55,40	30	0,84	10,73	0,19
12	51,35	30	0,84	10,61	0,21
13	102,14	30	0,84	12,15	0,12
14	100,50	30	0,84	12,10	0,12
15	54,42	30	0,84	10,70	0,19
16	54,57	30	0,84	10,70	0,19
17	206,95	30	0,86	16,35	0,07
18	92,44	30	0,84	11,83	0,12
19	54,05	30	0,84	10,69	0,19
20	52,12	30	0,84	10,63	0,20
21	69,78	30	0,84	11,14	0,15
22	78,32	30	0,84	11,40	0,14
23	60,09	30	0,84	10,86	0,18
24	62,58	30	0,84	10,93	0,17

З табл. 2 середнє значення питомої енергоємності становить близько 0,38 кВт·год/м³, що на ~18–19 % вище за показник із частотним регулюванням (0,32 кВт·год/м³). Вночі при малих витратах ($Q < 20$ м³/год) енергоємність суттєво зростає через дроселювання, що відображено в таблиці.

Графік добової динаміки енергоємності (рис. 1) відображає характерну змінність навантажень і підтверджує адаптивність системи до змін водоспоживання.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування частотного регулювання навіть для окремих агрегатів насосної станції, що дозволяє підвищити загальну енергоефективність системи,

зменшити зношування обладнання та покращити якість керування.

Таблиця 2 – Споживана електроенергія та енергоємність насосної станції без частотного регулювання

t, год	Q, м ³ /год	H, м	пвідн	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м ³
1	62,33	30	1,00	13,40	0,215
2	156,80	30	1,00	19,29	0,123
3	40,38	30	1,00	13,65	0,338
4	16,79	30	1,00	13,01	0,775
5	12,42	30	1,00	12,49	1,006
6	7,98	30	1,00	11,79	1,477
7	14,93	30	1,00	12,03	0,805
8	14,56	30	1,00	11,92	0,818
9	40,31	30	1,00	13,63	0,338
10	52,96	30	1,00	13,23	0,250
11	55,40	30	1,00	13,43	0,242
12	51,35	30	1,00	12,93	0,252
13	102,14	30	1,00	11,97	0,117
14	100,50	30	1,00	11,76	0,116
15	54,42	30	1,00	13,13	0,241
16	54,57	30	1,00	13,16	0,241
17	206,95	30	1,00	19,67	0,095
18	92,44	30	1,00	11,66	0,126
19	54,05	30	1,00	13,02	0,241
20	52,12	30	1,00	12,56	0,241
21	69,78	30	1,00	13,23	0,189
22	78,32	30	1,00	13,58	0,173
23	60,09	30	1,00	12,63	0,210
24	62,58	30	1,00	13,13	0,210

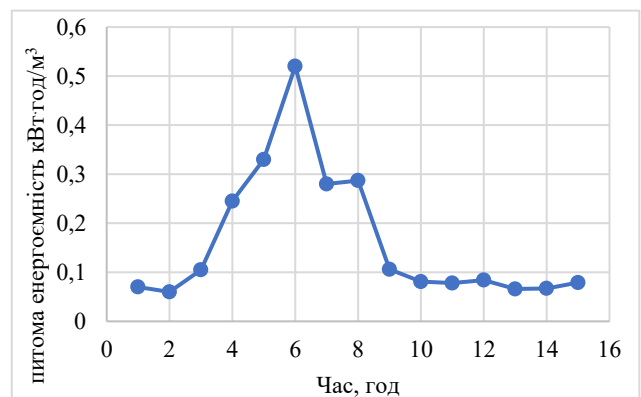


Рисунок 1 – Графік зміни питомої енергоємності протягом доби

Також в результаті дослідження було реалізовано комбіновану схему регулювання насосної станції на базі трьох агрегатів типу КМ 100–80–160, де один насос працює під керуванням частотного перетворювача, а два інші – у фіксованому режимі. Такий підхід дозволив оптимізувати роботу системи відповідно до змін попиту, забезпечуючи точну подачу води при мінімальних енергетичних затратах.

Згідно з результатами (табл. 3), середнє значення питомої енергоємності при комбінованому регулюванні становило 0,06 кВт·год/м³, що є найнижчим серед усіх розглянутих варіантів. Це свідчить про високу ефективність комбінованої схеми, особливо в умовах змінного навантаження, характерного для промислових об'єктів.

Таблиця 3 – Споживана електрична енергія і енергоємність насосної станції при комбінованому регулюванні

t, год	Q, м³/год	n, штук	$\eta_{\text{відн.}}$	H, м	N, кВт	ЕЕ, кВт·год/м³
1	62,33	1	0,97	30	4,33	0,069
2	156,80	3	0,94	30	9,14	0,058
3	40,38	1	0,95	30	4,29	0,106
4	16,79	1	0,94	30	4,20	0,250
5	12,42	1	0,93	30	4,18	0,336
6	7,98	1	0,93	30	4,15	0,520
7	14,93	1	0,94	30	4,19	0,280
8	14,56	1	0,94	30	4,19	0,287
9	40,31	1	0,95	30	4,29	0,106
10	52,96	1	0,96	30	4,31	0,081
11	55,40	1	0,97	30	4,32	0,078
12	51,35	1	0,96	30	4,31	0,084
13	102,14	2	0,95	30	6,74	0,066
14	100,50	2	0,95	30	6,73	0,067
15	54,42	1	0,96	30	4,32	0,079

Таким чином, були встановлені наступні переваги в ході експерименту:

- зниження енергоспоживання в нічний час завдяки відключенню зайвих агрегатів;
- забезпечення стабільного тиску в мережі за рахунок гнучкого керування частотою;
- зменшення пускових навантажень і гідравлічних ударів;
- підвищення надійності та довговічності насосного обладнання.

На основі отриманих результатів здійснена порівняльна оцінка результатів (табл. 4).

Таблиця 4 – Порівняльна оцінка результатів дослідження

Параметр	Без регулювання	Частотне регулювання	Комбіноване регулювання
Середня питома енергоємність, кВт·год/м³	~0,45	0,32	0,06
Енергозбереження, %	–	до 30 %	до 60 %
Адаптивність до навантаження	Низька	Середня	Висока
Стабільність тиску в мережі	Незадовільна	Хороша	Відмінна

Висновки. На основі отриманих результатів сформуємо висновки: частотне регулювання дозволяє ефективно адаптувати роботу насосної станції до змін водоспоживання; комбінована стратегія керування забезпечує максимальну енергоекономічність та технологічну стабільність; отримані результати є підставою для широкого впровадження частотних і комбінованих регулювань на об'єктах водопостачання, особливо у виробничих і муніципальних системах.

Список літератури

1. Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics / C. Wang et al. *Applied Energy*. 2017. Vol. 187. P. 10–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.046>.

2. Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes / A. Kandi et al. *Energy*. 2021. Vol. 217. 119402. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119402>.
3. Comparative study of energy consumption and CO₂ emissions of variable-speed electric drives with induction and synchronous reluctance motors in pump units / V. Goman et al. *Mathematics*. 2021. Vol. 9, no. 21. 2679. DOI: <https://doi.org/10.3390/math9212679>.
4. 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. 117311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117311>.
5. 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, no. 22. 10430. DOI: <https://doi.org/10.3390/app142210430>.
6. Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit / M. Moshnoriz et al. *Machinery & Energetics*. 2024. Vol. 15, no. 4. P. 94–105. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.94>.
7. Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications / V. Kazakbaev et al. *Energies*. 2019. Vol. 12, no. 6. 1144. DOI: <https://doi.org/10.3390/en12061144>.
8. 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 Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. 2024. № 3(496). С. 80–86. DOI: [https://doi.org/10.15589/znpp2024.3\(496\).12](https://doi.org/10.15589/znpp2024.3(496).12).
9. Energy efficiency in pumps / D. Kaya et al. *Energy Conversion and Management*. 2008. Vol. 49, no. 6. P. 1662–1673. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.010>.
10. Coelho B., Andrade-Campos A. Efficiency achievement in water supply systems—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 30. P. 59–84. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010>.
11. Pump feature construction and electrical energy consumption prediction based on feature engineering and lightgbm algorithm / Z. Yin et al. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, no. 1. 789. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15010789>.
12. Gassar A. A. A., Cha S. H. Energy prediction techniques for large-scale buildings towards a sustainable built environment: a review. *Energy and Buildings*. 2020. Vol. 224. 110238. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110238>.
13. Problem of data imbalance in building energy load prediction: concept, influence, and solution / C. Zhang et al. *Applied Energy*. 2021. Vol. 297. 117139. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117139>.
14. Numerical research on performance prediction for centrifugal pumps / M. Tan et al. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 2010. Vol. 23. P. 21–26. URL: https://www.researchgate.net/publication/237575353_Numerical_Research_on_Performance_Prediction_for_Centrifugal_Pumps.

References

1. C. Wang et al., “Optimal design of multistage centrifugal pump based on the combined energy loss model and computational fluid dynamics,” *Applied Energy*, vol. 187, pp. 10–26, Feb. 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.046>.
2. A. Kandi, M. Moghimi, M. Tahani, and S. Derakhshan, “Optimization of pump selection for running as turbine and performance analysis within the regulation schemes,” *Energy*, vol. 217, Feb. 2021, Art. no. 119402, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119402>.
3. V. Goman, V. Prakht, V. Kazakbaev, and V. Dmitrievskii, “Comparative study of energy consumption and CO₂ emissions of variable-speed electric drives with induction and synchronous reluctance motors in pump units,” *Mathematics*, vol. 9, no. 21, Oct. 2021, Art. no. 2679, doi: <https://doi.org/10.3390/math9212679>.
4. T. Hieninger, R. Schmidt-Vollus, and E. Schlücker, “Improving energy efficiency of individual centrifugal pump systems using model-free and on-line optimization methods,” *Applied Energy*, vol. 304, Dec. 2021, Art. no. 117311, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117311>.

5. H. Lavrič, K. Drobnič, and R. Fišer, "Model-based assessment of energy efficiency in industrial pump systems: A case study approach," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, Nov. 2024, Art. no. 10430, doi: <https://doi.org/10.3390/app142210430>.
6. M. Moshnoriz, A. Tkachuk, M. Moshnoriz, and O. Gribovskij, "Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit," *Machinery & Energetics*, vol. 15, no. 4, pp. 94–105, 2024, doi: <https://doi.org/10.31548/machinery/4.2024.94>.
7. V. Kazakbaev, V. Prakht, V. Dmitrievskii, M. Ibrahim, S. Oshurbekov, and S. Sarapulov, "Efficiency analysis of low electric power drives employing induction and synchronous reluctance motors in pump applications," *Energies*, vol. 12, no. 6, Mar. 2019, Art. no. 1144, doi: <https://doi.org/10.3390/en12061144>.
8. A. O. Semenov, V. O. Skrypyk, R. M. Kharak, and O. S. Suprovych, "Justification of rational parameters of electric drives for pump units in agro-industrial complex systems," *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*, no. 3(496), pp. 80–86, 2024, doi: [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).12](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).12) (in Ukrainian).
9. D. Kaya, E. A. Yagmur, K. S. Yigit, F. C. Kilic, A. S. Eren, and C. Celik, "Energy efficiency in pumps," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 6, pp. 1662–1673, Jun. 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.11.010>.
10. B. Coelho and A. Andrade-Campos, "Efficiency achievement in water supply systems – A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 59–84, Feb. 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.010>.
11. Z. Yin *et al.*, "Pump feature construction and electrical energy consumption prediction based on feature engineering and lightgbm algorithm," *Sustainability*, vol. 15, no. 1, Jan. 2023, Art. no. 789, doi: <https://doi.org/10.3390/su15010789>.
12. A. Gassar and S.H. Cha, "Energy prediction techniques for large-scale buildings towards a sustainable built environment: a review," *Energy and Buildings*, vol. 224, Oct. 2020, Art. no. 110238, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110238>.
13. C. Zhang, J. Li, Y. Zhao, T. Li, and W. Qiu, "Problem of data imbalance in building energy load prediction: Concept, influence, and solution," *Applied Energy*, vol. 297, Sep. 2021, Art. no. 117139, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117139>.
14. M. Tan, S. Yuan, H. Liu, Y. Wang, and K. Wang, "Numerical research on performance prediction for centrifugal pumps," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 23, pp. 21–26, 2010. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/237575353_Numerical_Research_on_Performance_Prediction_for_Centrifugal_Pumps.

Надійшло (received) 18.08.2025

UDC 621.313.333:62

SEMENOV ANATOLIY ✉ – Candidate of Physical and Mathematical Sciences (PhD), Docent, Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3184-6925>; e-mail: asemen2015@gmail.com.

SKRYPNYK VIACHESLAV – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8883-7398>; e-mail: viacheslav.skrypyk@pdau.edu.ua.

SAKHNO TAMARA – Doctor of Chemical Sciences, Senior Research Fellow, Professor at the Department of Biotechnology and Chemistry, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7049-4657>; e-mail: sakhno2001@gmail.com.

BUT ANDRII – Postgraduate Student of the Department of Mechanical and Electrical Engineering, Poltava State Agrarian University; Poltava, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4925-8313>; e-mail: andrii.h.but@pdau.edu.ua.

OPTIMIZATION OF PUMP UNIT ELECTRIC DRIVES IN WATER SUPPLY SYSTEMS BASED ON FREQUENCY CONTROL

The article examines the issue of improving the energy efficiency of pumping stations through the modernization of their electric drives by implementing frequency and combined control methods. The relevance of the problem is determined by the rising cost of energy resources, the increasing requirements for the efficiency of technological processes, and the significant share of electricity consumed by pumping equipment in industry and public utilities. The feasibility of transitioning from non-adjustable asynchronous electric motors to frequency-controlled systems is substantiated, enabling pumps to adapt to changes in water consumption, reduce energy consumption, improve network pressure stability, extend equipment service life, and lower maintenance and repair costs. The paper presents the results of mathematical modeling of pumping station operating modes based on similarity laws and an analysis of daily operating graphs for various control modes. It confirms a reduction in specific energy consumption with frequency control to 0.32 kWh/m³, as well as the effectiveness of a combined control scheme using three pump units, one of which operates with a frequency converter. This approach achieved a minimum specific energy consumption of 0.06 kWh/m³, corresponding to up to 60 % energy savings compared to traditional non-regulated schemes. The study confirmed that the implementation of frequency and combined control makes it possible to significantly increase the energy efficiency of pumping units under variable load conditions, reduce hydraulic shocks, lower starting currents, and improve equipment reliability. The developed recommendations can be applied in the modernization of existing pumping stations, the planning of investment projects in the water supply sector, and the implementation of automated control systems for industrial and municipal facilities.

Keywords: electric drive; pump unit; frequency control; energy efficiency; water supply; automated control.