

<https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-06>
УДК 621.65:681.5

¹В. А. ДРОЗД,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: volodyadrozd2296@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4335-7558>

¹Ю. О. КРАМАРЕНКО,

аспірант кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій
e-mail: kramarenkoura@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1937-9756>

¹Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна,
Майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна.

ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПОТУЖНИХ НАСОСІВ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

У статті досліджується проблема підвищення показників якості роботи потужних насосних агрегатів електростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування. Насоси великої потужності (більше 1 МВт) є критичними елементами енергетичної інфраструктури, що забезпечують роботу циркуляційних, живильних та охолоджувальних контурів. Нестабільність їх функціонування, затягнуті перехідні процеси та надмірні динамічні навантаження призводять до зниження енергоефективності, зростання експлуатаційних витрат і скорочення ресурсу обладнання. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вдосконалення алгоритмів керування для забезпечення стабільного та економічного режиму роботи насосів в умовах змінних навантажень і високих вимог до надійності. У роботі сформовано математичну модель потужного насоса, що включає напірні, енергетичні та потужнісні характеристики, а також динамічні рівняння другого порядку, які описують взаємодію насоса та електроприводу. На основі моделювання досліджено вплив параметрів ПД-регулятора на динаміку системи й визначено інтегральні критерії якості (ISE, IAE, ITAE). Наведено результати порівняння оптимізованих і неоптимальних налаштувань, які демонструють суттєве зменшення перерегулювання, скорочення часу перехідного процесу та зниження інтегральних помилок у 1,7–7 разів.

Побудовані напірні, енергетичні та потужнісні характеристики реального насоса потужністю 2000 кВт, а також графіки перехідних процесів і енергетичних показників для різних режимів керування. Запропоновано комплексний показник якості, що поєднує динамічні та енергетичні критерії. Отримані результати підтверджують ефективність оптимізації ПД-регулятора та можуть бути використані при модернізації систем керування насосами електростанцій, підвищенні їхньої надійності та енергоефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: показники якості, енергоефективність, електростанція, насосні установки, система керування.

Як цитувати: Дрозд В. А., Крамаренко Ю. О. Підвищення показників якості потужних насосів електростанцій шляхом оптимізації систем автоматичного керування. *Машинобудування*. 2025. Вип. 36. С. 60-69. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-06>

Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями

Потужні насосні агрегати є ключовими елементами інфраструктури теплових та атомних електростанцій. Від стабільності їхнього функціонування залежить робота систем теплоносія, градирень, деаераційних і циркуляційних контурів. Неоптимальна робота систем керування призводить до надлишкових енергетичних витрат, зростання вібрацій, погіршення динаміки та зменшення ресурсу обладнання.

Складність задачі зумовлена нелінійністю характеристик насосів та приводів, наявністю інерційних ланок, варіативністю навантажень і зношуванням елементів. Саме тому особливої актуальності набуває розроблення математично обґрунтованих методів оптимізації ПД-регуляторів, що дозволяють поліпшити якість керування, підвищити ККД агрегатів та зменшити витрати електроенергії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання підвищення ефективності та надійності потужних насосних агрегатів теплових та атомних електростанцій посідає важливе місце у сучасних дослідженнях з енергетики та автоматизації. У працях українських дослідників розглядаються особливості гідравлічних характеристик насосів великої потужності, вплив режимів експлуатації на напір, подачу та кавітаційні запаси [1–3]. Наголошується, що саме форма напірної характеристики та її чутливість до зміни частоти обертання визначають можливості реалізації енергоефективного регулювання.

У роботах, присвячених теорії автоматичного керування [4–6], детально аналізуються властивості ПІД-регуляторів, питання стійкості замкнених систем та вибору параметрів за інтегральними критеріями. Показано, що для інерційних об'єктів другого порядку, до яких належать електроприводні насосні установки, неправильний вибір коефіцієнтів призводить до значних перерегулювань, затягнутих перехідних процесів і підвищених динамічних навантажень на механічні вузли. Окремі дослідження зосереджені на використанні частотних перетворювачів і векторного керування, що забезпечують гнучку зміну частоти обертання та дозволяють узгоджувати робочу точку насоса з оптимальним діапазоном ККД [7–9].

Суттєву увагу приділено питанням формалізованої оцінки якості регулювання. У низці робіт розглядається застосування

інтегральних критеріїв ISE, IAE та ITAE для порівняння різних варіантів налаштування регуляторів і вибору їх оптимальних параметрів [10–12]. Показано, що критерій ITAE є особливо чутливим до тривалих відхилень і доцільний для об'єктів із великими енерговитратами, де затягнуті перехідні процеси призводять до відчутних економічних втрат. У публікаціях, присвячених енергозбереженню в насосних системах, обґрунтовано необхідність комплексного підходу, який поєднує гідравлічну оптимізацію, вибір вискоефективних приводів та вдосконалення алгоритмів автоматичного керування [13, 14].

У роботах з математичного моделювання гідравлічних систем [15] запропоновано універсальні моделі другого порядку з урахуванням інерційності потоку, пружності трубопроводів та динаміки електроприводу. Такі моделі є придатними для чисельного аналізу перехідних процесів і налаштування ПІД-регуляторів за інтегральними критеріями. Разом з тим, у наявних публікаціях недостатньо висвітлено специфіку оптимізації систем керування саме для потужних насосів теплових та атомних (5–8 МВт) з урахуванням їх напірних, енергетичних та потужнісних характеристик. Це зумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на побудову узагальненої моделі такого агрегату та кількісну оцінку вигаду від оптимізації параметрів ПІД-регулятора за інтегральними й комплексними показниками якості.

Постановка мети та завдання дослідження

Мета роботи – підвищення показників якості потужних насосів теплових і атомних електростанцій шляхом оптимізації параметрів ПІД-регулятора на основі математичного моделювання динаміки та енергетики агрегату.

Завдання дослідження:

1. Побудувати математичну модель насоса великої потужності.
2. Сформулювати напірні, енергетичні та потужнісні характеристики насоса.

3. Розробити динамічну модель «насос-привід» другого порядку.
4. Виконати моделювання ПІД-регулятору для оптимальних та не оптимальних налаштувань.
5. Розрахувати критерії ISE, IAE, ITAE.
6. Обчислити комплексний показник якості.
7. Провести порівняльний аналіз ефективності різних режимів керування

Виклад основного матеріалу

1. Об'єкт дослідження та припущення моделі

Як об'єкт дослідження розглядається потужний відцентровий насос з електроприводом номінальною потужністю $P_{\text{ном}}=2000$ кВт. Насос працює у складі циркуляційної або живильної системи, а його режим задається зміною частоти обертання електропривода за допомогою системи автоматичного керування.

Для побудови математичної моделі приймаються такі припущення:

- робоче середовище – рідина з практично сталою густиною (вода);
- робоча точка знаходиться в околі номінального режиму, що дозволяє лінеаризувати динамічні рівняння;
- динаміка системи «насос–електропривод–гідравлічна частина» описується моделлю другого порядку з єдиною вхідною координатою (керувальний вплив) та вихідною координатою (регульований параметр – подача або напір).

2. Статичні характеристики насосу

Напірна характеристика.

У спрощеному вигляді напірна характеристика (рис. 1) відцентрового насоса в околі номінального режиму описується квадратичною залежністю:

$$H(Q) = H_0 - kQ^2, \quad (1)$$

де $H(Q)$ – напір, м; Q – подача насоса, м³/с; H_0 – напір при нульовій подачі (закритій засувці), м; k – коефіцієнт крутизни напірної характеристики, що визначається за паспортними даними.

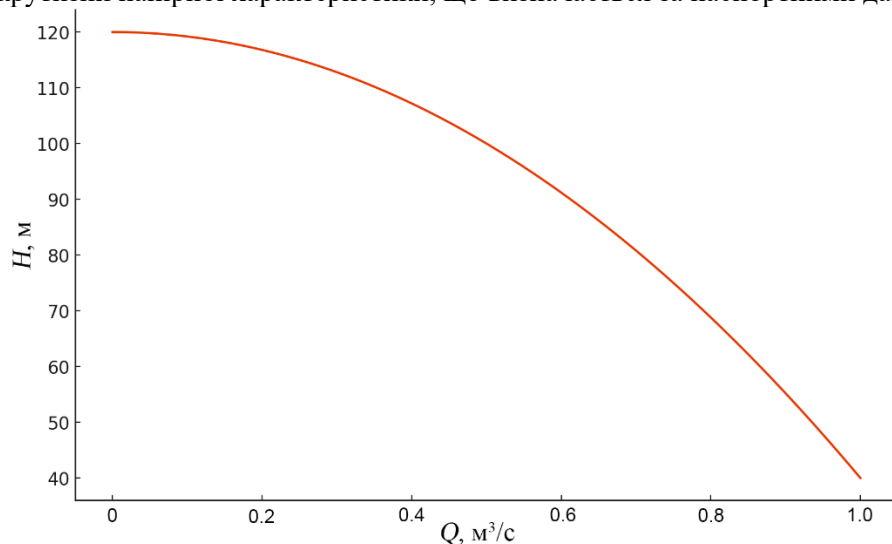


Рис. 1 – Напірна характеристика насоса

Fig. 1 – Pump pressure characteristic

Енергетична характеристика. Коефіцієнт корисної дії насоса як функція подачі приймається у вигляді «дзвоноподібної» залежності (рис. 2):

$$\eta(Q) = \eta_{\text{max}} \exp \left[-\frac{(Q - Q_{\text{opt}})^2}{2\sigma^2} \right], \quad (2)$$

де η_{max} – максимальний ККД у точці оптимальної подачі Q_{opt} ; σ – параметр, що характеризує ширину області високого ККД. Потужнісна характеристика.

Споживана потужність при сталому режимі визначається (рис. 3):

$$P(Q) = \frac{\rho g Q H(Q)}{\eta(Q)}, \quad (3)$$

де ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

Для нормування й порівняння режимів в роботі використовується відносна потужність та відносна подача (поділені на номінальні значення).

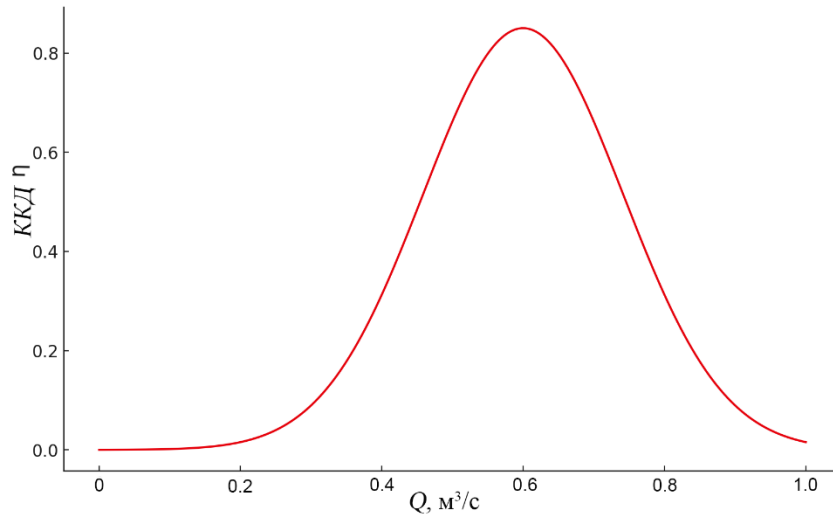


Рис. 2 – Характеристика ККД насосу
Fig. 2 – Pump efficiency characteristics

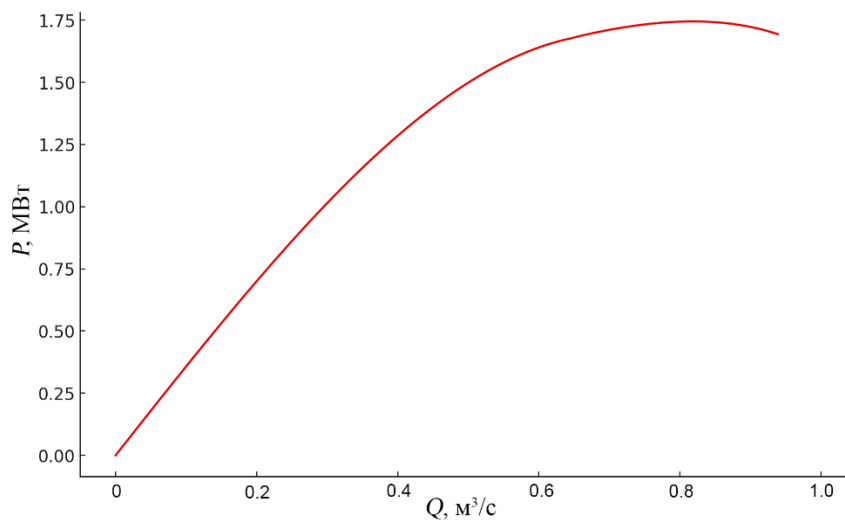


Рис. 3 – Характеристика потужності насосу
Fig. 3 – Pump power characteristics

3. Динамічна модель системи «насос–електропривод»

Динаміка системи в околі робочої точки описується лінеаризованою моделлю другого порядку:

$$\ddot{y}(t) + a\dot{y}(t) + by(t) = K \cdot u(t), \quad (4)$$

де $y(t)$ – вихідна координата (відхилення подачі або напору від заданого значення); $u(t)$ – вхідний сигнал керування (наприклад, відносна зміна частоти обертання електропривода); a – коефіцієнт, що характеризує сумарне «дисипативне» (демпфувальне) тертя та втрати; b –

«жорсткість» системи, пов'язана з гідравлічними й механічними властивостями; K – коефіцієнт підсилення каналу «керування – вихідний параметр».

У операторній формі (за Лапласом) передатна функція об'єкта має вигляд:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{K}{p^2 + ap + b}. \quad (5)$$

Таким чином, система є інерційною ланкою другого порядку з коефіцієнтом підсилення K , а параметри a , b визначають швидкодію та ступінь коливальності.

4. Модель ПД-регулятора

Для регулювання параметра $y(t)$ застосовується ПД-регулятор:

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}, \quad (6)$$

де $e(t) = y_{\text{зад}}(t) - y(t)$ – похибка регулювання; K_P , K_I , K_D – пропорційна, інтегральна та диференціальна складові відповідно.

В операторній формі:

$$W_{\text{ПД}}(p) = K_P + \frac{K_I}{p} + K_D \cdot p. \quad (7)$$

Замкнена система утворюється шляхом з'єднання $W_{\text{ПД}}(p)$ і $W_{\text{об}}(p)$ в контурі з одиничним зворотним зв'язком. Перехідні процеси при оптимальному ($K_P=8,0$; $K_I=1,2$; $K_D=0,2$) та неоптимальному ($K_P=2,0$; $K_I=0,1$; $K_D=0,01$) налаштуванні ПД-регулятора наведені на рис. 4.

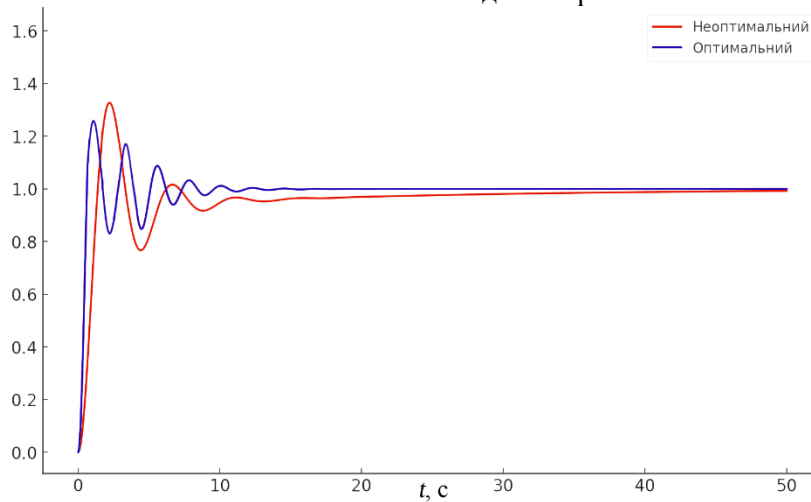


Рис. 4 – Перехідні характеристики насосу

Fig. 4 – Pump transient characteristics

5. Інтегральні критерії якості

Для кількісної оцінки якості перехідних процесів використано три класичні інтегральні критерії:

Інтеграл квадрата похибки (ISE):

$$\text{ISE} = \int_0^T e^2(t) dt; \quad (8)$$

Інтеграл абсолютної похибки (IAE):

$$\text{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt; \quad (9)$$

Інтеграл абсолютної похибки, зважений за часом (ITAE):

$$\text{ITAE} = \int_0^T t |e(t)| dt, \quad (10)$$

де T – тривалість спостереження перехідного процесу.

За результатами моделювання отримано такі значення для перехідного процесу при одиничному стрибку завдання:

Неоптимальний ПД-регулятор:

$$\text{ISE}_{\text{неопт}} = 0,8240;$$

$$\text{IAE}_{\text{неопт}} = 2,6602;$$

$$\text{ITAE}_{\text{неопт}} = 25,9828.$$

Оптимізований ПД-регулятор:

$$\text{ISE}_{\text{опт}} = 0,6291;$$

$$\text{IAE}_{\text{опт}} = 1,5271;$$

$$\text{ITAE}_{\text{опт}} = 3,6154.$$

6. Комплексний показник якості

Для зручності порівняння різних варіантів налаштування регулятора введемо безрозмірний комплексний показник якості K_{Σ} , який враховує одночасно три критерії ISE, IAE, ITAE.

Спочатку нормуємо кожен критерій відносно «базового» (неоптимального) варіанту:

$$ISE^* = \frac{ISE}{ISE_{\text{норм}}}; \quad IAE^* = \frac{IAE}{IAE_{\text{норм}}}; \quad ITAE^* = \frac{ITAE}{ITAE_{\text{норм}}}. \quad (11)$$

Для оптимального режиму отримуємо:

$$ISE^* = \frac{ISE_{\text{опт}}}{ISE_{\text{норм}}} = \frac{0,6291}{0,8240} = 0,76;$$

$$IAE^* = \frac{IAE_{\text{опт}}}{IAE_{\text{норм}}} = \frac{1,5271}{2,6602} = 0,57; \quad (12)$$

$$ITAE^* = \frac{ITAE_{\text{опт}}}{ITAE_{\text{норм}}} = \frac{3,6154}{25,9828} = 0,14.$$

Далі формуємо узагальнений інтегральний функціонал:

$$J = w_1 ISE^* + IAE^* + w_3 ITAE^*, \quad (12)$$

де w_1, w_2, w_3 – вагові коефіцієнти, що визначають відносну важливість кожного критерію ($w_1 + w_2 + w_3 = 1$).

У даній роботі прийнято: $w_1 = 0,3$, $w_2 = 0,3$, $w_3 = 0,4$.

Для неоптимального варіанту:

$$J_{\text{неопт}} = 0,3 \cdot 1 + 0,3 \cdot 1 + 0,4 \cdot 1 = 1. \quad (13)$$

Для оптимального варіанту:

$$J_{\text{неопт}} = 0,3 \cdot 0,76 + 0,3 \cdot 0,57 + 0,4 \cdot 0,14 = 0,228 + 0,172 + 0,056 = 0,456 \quad (14)$$

Тоді комплексний показник якості визначимо як:

$$K_{\Sigma} = \frac{1}{J}. \quad (15)$$

Отже, для неоптимального регулятора:

$$K_{\Sigma}^{\text{неопт}} = \frac{1}{J_{\text{неопт}}} = 1; \quad (16)$$

для оптимізованого регулятора:

$$K_{\Sigma}^{\text{опт}} = \frac{1}{0,456} = 2,19. \quad (17)$$

Таким чином, комплексний показник якості для оптимального ПД-регулятора приблизно в 2,2 рази вищий, ніж для неоптимального, що кількісно відображає суттєве покращення динамічних властивостей системи та зменшення інтегральних втрат.

Обговорення результатів

Порівняльний аналіз демонструє, що оптимальний ПД-регулятор забезпечує помітно кращі динамічні властивості системи. Зменшення ISE свідчить про скорочення сумарної квадратичної похибки, IAE – про зменшення відхилень від заданої траєкторії, ITAE – про зниження тривалості коливань. Фактично, ITAE зменшився у 7 разів, що є ключовим показником для

потужних насосів, оскільки зatoryжні коливання призводять до збільшення навантаження на підшипники, вали та електропривод. Оптимізація регулятора забезпечує також зниження споживаної потужності за рахунок більш точного потрапляння в оптимум ККД насоса, зменшення надлишкових режимів і уникнення перевантажень.

Висновки

Розроблено комплексну модель насоса потужністю 2 МВт, що включає гідравлічні, енергетичні та динамічні характеристики. 2. Виконано моделювання процесів регулювання подачі з використанням ПД-регулятора. 3. Встановлено, що оптимальне налаштування ПД-регулятора дозволяє зменшити інтегральні помилки у 1,7–

7 разів. 4. Отримані результати підтверджують доцільність модернізації систем керування потужними насосними агрегатами з використанням оптимізаційних алгоритмів. 5. Запропонована методика може бути використана для підвищення енергоефективності насосних систем теплових і атомних електростанцій.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаних джерел:

1. Матвійчук В. А. Математичне моделювання новітніх технологічних систем: Монографія / В. А. Матвійчук, Н. Р. Веселовська, С. А. Шаргородський. – Вінниця, 2021. – 193 с. – Режим доступу : <http://repository.vsau.org/getfile.php/29057.pdf> (дата звернення 24.09.2025)
2. Лисяк В. Г. Моделювання динамічних режимів роботи асинхронного електроприводу з відцентровим насосним навантаженням / В. Г. Лисяк, М. Й. Олійник // Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки. – 2021. – Вип. (42). – С. 113-121. DOI: 10.31498/2225-6733.42.2021.240665.
3. Мовчан С. І. Алгоритм імітаційної моделі функціонування насосної станції підкачування зрошуваних меліорацій / С. І. Мовчан // Праці ТДАТУ. – Мелітополь, 2019. – Вип. 19, т. 4. – С. 245-252. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-245-252
4. Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve / W. G. Zhang, W. D. Yang, F. X. Dou, L. J. Wang // Petrochemical Equipment. – 2016. – Vol. 45, № 6. – P. 73-76. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016>
5. Ogata K. Modern Control Engineering – Upper Saddle River / Ogata K. – Prentice Hall, 2010. – 912 p. – Access mode : https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf (Last accessed September 24, 2025)
6. Nise N. S. Control Systems Engineering / Nise N. S. – Hoboken : Wiley, 2019. – 1030 p. – Access mode : <https://gnindia.dronacharya.info/EEE/5thSem/Downloads/ControlSystem/Books/CONTROL-SYSTEM-REFERENCE-BOOK-2.pdf> (Last accessed September 24, 2025)
7. Xu P. Design of Monitoring and Control System of Hydraulic Pump Station Based on Internet of Things / P. Xu & S. Zhang // Advancing Computing as a Science & Profession. – 2025. – Vol. 59. – P. 340-348. DOI: 10.3103/S0146411625700506
8. Dynamic Modelling of Centrifugal Hydraulic Load of Pumping Station Electric Drive / V. Lysiak et al. // JEECS. – 2019. – Vol. 5, no 1. – P. 1-8. DOI: 10.23939/jeecs2019.01.001
9. Modelling flow and pressure controlled pump stations with application to optimal pump scheduling // Sylvan Elhay, Michael Fischer, Olivier Piller, Jochen Deuerlein, Angus Ross Simpson // Cambridge Prisms: Water. – 2025. – № 3. – P. 1-14. DOI: 10.1017/wat.2025.10005
10. Derakhshan S. Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation / S. Derakhshan, A. Nourbakhsh // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2008. – Vol. 32, no 8. – P. 1620-1627.
11. Шудрик О. Л. Підвищення ефективності використання відцентрових насосів за рахунок вдосконалення математичних моделей робочого процесу : дис. ... канд. техн. наук:

спец. 05.05.17 / О. Л. Шудрик ; НТУ «ХП». – Харків, 2018. – 184 с. – Режим доступу : <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/d72c2df3-e451-4018-b181-fe90a3c53b9b/content> (дата звернення_24.09.2025)

12. Копей Б. В. Контроль технічного стану та підвищення ресурсу штангової свердловинної насосної установки : монографія / Копей Б. В., Лопатін В. В., Копей І. Б. // Нафтогазове обладнання : у 11 т. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2020. – Т. 11. – 378 с.

13. Increasing Energy Efficiency in Water Collection Systems by Submersible PMSM Well Pumps / M. Beck, A. Sperlich, R. Blank, E. Meyer, R. Binz, M. Ernst // Water. – 2018. – № 10(10):1310. DOI:10.3390/w10101310

14. Hydraulic Institute Standards for Rotodynamic Pumps. – New York : Hydraulic Institute, 2019. – 560 p. – Access mode : <https://www.pumps.org/> (Last accessed September 24, 2025)

15. Сільвестров А. М. Методи дослідження електротехнічних комплексів і систем [Електронний ресурс] : монографія / М. Я. Островерхов, А. М. Сільвестров, К. Х. Зеленський ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : Талком, 2019. – 301 с. – Режим доступу : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47969> (дата звернення_24.09.2025)

Отримано: 18.08.2025

Прийнято 24.09.2025

Опубліковано: 30.12.2025

¹V. DROZD,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies

e-mail: volodyadrozd2296@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4335-7558>

¹Y. KRAMARENKO,

Postgraduate student of the Department of Automation, Metrology and Energy-Efficient Technologies

e-mail: kramarenkoura@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1937-9756>

¹V.N. Karazin Kharkiv National University
4 Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine.

IMPROVING THE QUALITY PERFORMANCE OF HIGH-POWER ELECTRIC POWER PLANT PUMPS THROUGH OPTIMIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The article examines the problem of improving the quality performance of high-power pump units at electric power plants through the optimization of automatic control systems. High-power pumps (over 1 MW) are critical components of the energy infrastructure, ensuring the operation of circulation, feedwater, and cooling circuits. Instability of their functioning, prolonged transient processes, and excessive dynamic loads lead to reduced energy efficiency, increased operational costs, and shortened equipment lifetime. The relevance of the study is determined by the need to improve control algorithms in order to ensure stable and efficient pump operation under variable loads and stringent reliability requirements.

The paper presents a mathematical model of a high-power pump, which includes head-flow, energy, and power characteristics, as well as second-order dynamic equations describing the interaction between the pump and the electric drive. Based on simulation, the influence of PID controller parameters on system dynamics is investigated, and integral quality criteria (ISE, IAE, ITAE) are evaluated. The obtained results demonstrate significant reductions in overshoot, shorter transient response times, and a decrease in integral errors by a factor of 1.7–7 when applying optimized controller settings compared to non-optimized ones.

Head, energy, and power characteristics of a real 2000 kW pump are constructed, along with transient response plots and energy performance diagrams for different control modes. A comprehensive quality index combining dynamic and energy-efficiency criteria is proposed. The results confirm the effectiveness of PID controller optimization and can be used for modernization of pump control systems at power plants to enhance their reliability and energy efficiency.

Keywords: quality indicators, energy efficiency, power plant, pumping units, control system.

In cites: Drozd V., Kramarenko Y. (2025), Improving the quality performance of high-power electric power plant pumps through optimization of automatic control systems. *Engineering*, (36), 60-69. <https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-06> (in Ukraine)

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of the manuscript. In addition, the authors fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References:

1. Matvijchuk, VA, Veselovska, NR & Shargorodskij, SA 2021, *Matematichne modelyuvannya novitnih tehnologichnih sistem* [Mathematical modeling of advanced technological systems], Vinnicya: 2021. – 193 p. ISBN 978-966-949-855-7 <http://repository.vsau.org/getfile.php/29057.pdf> (in Ukraine)
2. Lisyak, VG & Olijnik, MJ 2021, ‘Modeling dynamic operating modes of an asynchronous electric drive with centrifugal pump load’, *Visnik Priazovskogo Derzhavnogo Tehnichnogo Universitetu. Seriya: Tehnichni nauki*, iss. (42), Pp. 113-121. DOI: 10.31498/2225-6733.42.2021.240665. (in Ukraine)
3. Movchan, SI 2019, ‘Algorithm of a simulation model of the functioning of a pumping station for pumping irrigated land reclamation’, *Praci TDATU*, iss. 19, vol. 4, Pp. 245-252. DOI: 10.31388/2078-0877-19-4-245-252 (in Ukraine)
4. Zhang, WG, Yang, WD, Dou, FX & Wang, LJ 2016, ‘Combinative Control Method of Centrifugal Pump Based on Variable Frequency Drive and Auto Back Flow Control Valve’, *Petrochemical Equipment*, Vol. 45, no 6, Pp. 73-76. DOI: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7466.2016.06.016> (Last accessed September 24, 2025)
5. Ogata, K 2010, *Modern Control Engineering*. – Upper Saddle River. viewed <https://mechfamily-ju.com/storage/images/files/file_17314308026pQTy.pdf> (Last accessed September 24, 2025)
6. Nise, NS 2019, *Control Systems Engineering*, viewed <<https://gnindia.dronacharya.info/EEE/5thSem/Downloads/ControlSystem/Books/CONTROL-SYSTEM-REFERENCE-BOOK-2.pdf>> (Last accessed September 24, 2025)
7. Xu, P & Zhang, S 2025, ‘Design of Monitoring and Control System of Hydraulic Pump Station Based on Internet of Things’, *Advancing Computing as a Science & Profession*, Vol. 59, P. 340-348. DOI: 10.3103/S0146411625700506
8. Lysiak, V et al 2019, ‘Dynamic Modelling of Centrifugal Hydraulic Load of Pumping Station Electric Drive’, *JEECS*, Vol. 5, no 1, P. 1-8. DOI: 10.23939/jeeecs2019.01.001 (in Ukraine)
9. Elhay, S, Fischer, M, Fischer, O, Deuerlein, J & Simpson, AR 2025, ‘Modelling flow and pressure controlled pump stations with application to optimal pump scheduling’, *Cambridge Prisms: Water*, no 3, P. 1-14. DOI: 10.1017/wat.2025.10005
10. Derakhshan, S & Nourbakhsh, A 2008, ‘Theoretical, numerical and experimental investigation of centrifugal pumps in reverse operation’, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, no. 8, P. 1620-1627.
11. Shudrik, OL 2018, ‘Pidvishennya efektyvnosti vikoristannya vidcentrovih nasosiv za rahunok vdoskonalennya matematichnih modelej robochogo procesu’ [Increasing the efficiency of centrifugal pumps by improving mathematical models of the workflow], kand. tehn. n. thesis, NTU «HPI», Harkiv. (in Ukraine)
12. Kopej, BV, Lopatin, VV & Kopej, IB 2020, *Kontrol tehnicnogo stanu ta pidvishennya resursu shtangovoyi sverdlovinnoyi nasosnoyi ustanovki* [Control of technical condition and increase of resource of the rod drilling pump installation], Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2020. – 378 s. ISBN 978-966-694-349-4 (in Ukraine)

13. Beck, M, Sperlich, A, Blank, R, Meyer, E, Binz, R & Ernst, M 2018, 'Increasing Energy Efficiency in Water Collection Systems by Submersible PMSM Well Pumps', Water, no 10(10), 1310. DOI:10.3390/w10101310
14. Hydraulic Institute Standards for Rotodynamic Pumps, 2019, New York: Hydraulic Institute, 2019. – 560 p., viewed <https://www.pumps.org/> (Last accessed September 24, 2025)
15. Silvestrov, AM, Silvestrov, AM & Zelenskij, KH 2019, *Metodi doslidzhennya elektrotehnicnih kompleksiv i sistem* [Methods of research of electrical complexes and systems], Talkom, Kiyv. (in Ukraine)

Submission received: 08/18/2025 Accepted: 09/24/2025 Published: 12/30/2025