

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТОДІВ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НА
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ**

П. Б. Клендій, кандидат технічних наук, доцент,

М.М. Федірко, кандидат економічних наук, доцент,

В.Г. Камишлов кандидат технічних наук, доцент,

Західноукраїнський національний університет

О.П. Дудар, інженер

ВСП «Бережанський фаховий коледж НУБіП України»

E-mail: [pklen @i.ua](mailto:pklen@i.ua)

Анотація. *Насосні агрегати широко використовуються для перекачування різних рідин, а найбільше в системах водопостачання і водовідведення. Споживання води є випадковою функцією часу протягом доби (день, вечір, ранок) та залежить від пори року (літо, зима чи весна).*

Ефективність та економічність роботи підприємств холодного і гарячого водопостачання, опалення, водовідведення і водоочищення міст, міських і сільських районів може бути істотно підвищена за рахунок автоматизації та впровадження регульованих електроприводів.

У статті розглянуто методи підвищення енергоефективності автоматизованого електропривода насосної станції, розроблені на основі частотного перетворювача з використанням ПЧД – регулятора та МРС контролера. Проаналізовано існуючі технології регулювання продуктивності насосів такі як використання дросельних заслінок та частотних перетворювачів (ЧП). Для дослідження впливу частотного регулювання з ПЧД – регулятором та цифровим двійником на енергоефективність насосних агрегатів розроблено імітаційну модель в пакеті прикладних програм Matlab.

Проведені дослідження показують, що використання частотного керування забезпечує підтримування потрібних технологічних параметрів гідро мережі зменшення енерговитрат в порівнянні з дроселюванням при нерегульованому приводі насоса, оскільки робота на постійних оборотах призводить до значних енергетичних втрат, особливо у режимах неповного навантаження.

Застосування МРС контролера дозволяє покращити якість процесу регулювання в порівнянні з ПЧД регулятором і тим самим підвищити енергоефективність, антикавітаційний ефект, а предиктивна діагностика дефектів знижує незаплановні простой.

Оцінено потенціал зниження енергоспоживання та покращення ефективності роботи насосних станцій при використанні таких методів. Визначено основні

переваги та недоліки частотного регулювання, а також перспективи розвитку даних технологій в контексті енергозбереження.

Ключові слова: *автоматизований електропривод, водонасосна установка, частотне керування, МРС, цифровий двійник, ПІД регулятор, енергоефективність.*

Актуальність. Питання енергоефективності в промислових і комунальних установках набуває особливої актуальності в умовах зростання витрат на енергоносії та посилення вимог до збереження ресурсів. Насосні станції, як важливі елементи інфраструктури водопостачання, водовідведення та енергетичних систем, є значними споживачами електричної енергії. Традиційно їхня робота здійснювалася на постійних обертах, що призводило до значних енергетичних втрат, особливо у режимах неповного навантаження. Насоси є одними з основних джерел споживання електроенергії, тому навіть незначне підвищення ефективності (+1 %) може бути ефективним для протидії зростанню глобальних викидів парникових газів (принаймні -570 т CO₂/день у Європі) [1]. Насосні системи по всьому світу споживають високий відсоток електроенергії. Енергоефективність цих систем можна покращити за допомогою алгоритмів керування для визначення відповідних робочих точок [2]. Сучасні методи частотного регулювання дозволяють оптимізувати роботу насосних установок і знижувати енергоспоживання, що стає надзвичайно важливим у контексті глобальних зусиль з енергозбереження. Для узгодження режиму водопостачання меліоративної насосної станції з графіком водоспоживання єдиним практично використовуваним способом регулювання її продуктивності є зміна кількості працюючих агрегатів, що забезпечує ступеневе регулювання витрати подачі. У цьому випадку існує невідповідність між фактичним графіком водоспоживання та його покриттям, що забезпечується роботою насосного агрегату насосних станцій у переважній більшості діючих насосних станцій [3]. Дослідження [4] визначило, що використання частотного регулювання може значно знизити споживання енергії під час роботи відцентрового насосного агрегату, особливо в умовах змінного навантаження. Найвища ефективність досягається, коли насос працює на оптимальних швидкостях, чого можна досягти за допомогою частотно-регульованих приводів (ЧРП). У [5] доведено ефективність використання

двохпараметричного регулювання (одночасною зміною частоти обертання привідного двигуна та положення засувки на виході насоса) в системі частотно-регульованого електропривода при стабілізації тиску у споживача та зміні параметрів гідросистеми під час тривалої експлуатації для забезпечення режиму максимальної енергоефективності.

Для створення моделі цифрового двійника водоочисної станції було запропоновано метод побудови моделі цифрового двійника на основі п'ятивимірної моделі цифрового двійника з урахуванням усього процесу очищення води[6].

Використання інтелектуальної водопровідної мережі (SWG) з цифровим двійником (DT) для водної інфраструктури дозволить покращити моніторинг, управління та ефективність системи. Такий інструмент дозволяє здійснювати моніторинг компонентів системи в режимі реального часу, аналізуючи різні сценарії та змінні, такі як тиск, робочі пристрої, регулювання різних клапанів та коефіцієнти втрати напору[7].

Сучасна практика енергоощадження у насосних станціях спирається на приводи змінної швидкості (VFD) та каскадне керування групою насосів. Показано ефективність модельно-прогнозного керування (MPC) для дотримання тиску при піках споживання; активно розвиваються цифрові двійники для прогнозу витрат/втрат та сценарного аналізу.

Мета дослідження – розроблення та обґрунтування методів автоматизації, які забезпечують зменшення питомих енерговитрат, обмеження гідравлічних ударів і запобігання кавітації при змінних графіках водоспоживання

Матеріали та методи дослідження. Насоси, як правило, працюють в системі з протитиском, причому статичний тиск в системі складає звичайно не менше 20 % повного тиску. Виключенням є циркуляційні насоси, які можуть працювати на мережу трубопроводів, де практично не має статичного тиску.

Звичайно насоси обладнують нерегульованим електроприводом. Регулювання подачі здійснюється при цьому практично єдиним способом – дроселюванням на стороні нагнітання

Регулювання подачі води насосом застосовують у таких випадках.

1. При необхідності регулювання кількості рідини, що подається насосом, за вимогами технологічного процесу або у зв'язку з випадковою зміною потреби в рідині. Наприклад, подачу рідини циркуляційним насосом системи охолодження потрібно регулювати залежно від кількості теплоти, що підлягає відведенню; подача води насосом повинна змінюватися відповідно режиму водоспоживання.

2. Якщо не потрібне під час роботи регулювання подачі рідини насосом, але забезпечення необхідної подачі пов'язано з первинним підрегулюванням насоса. Наприклад, для подачі рідини на певну висоту H при постійних витраті Q і опорі гідромережі по каталогу вибирається насос з найближчими параметрами з номінальним тиском і витратою води. Тому для роботи із заданими параметрами тиск і витрата води насоса повинен бути понижений до необхідних значень. Якщо насос працює при незмінній швидкості, то найпростішим способом регулювання його подачі є той, що дроселює, тобто неповне відкриття засувки на напірному трубопроводі насоса.

Характеристикою насоса є залежність тиску H від витрати Q , яку з достатнім ступенем точності можна представити у вигляді:

$$H = H_{0H} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 - CQ^2, \quad (1)$$

де H_{0H} – тиск насоса при $Q = 0$ і $\omega = \omega_{ном}$; $\omega_{ном}$ – номінальна швидкість електродвигуна; C – конструктивний коефіцієнт насоса, $C = (H_{0H} - H_{ном})/Q_{ном}^2$; $Q_{ном}$ і $H_{ном}$ – номінальні витрата і тиск.

Характеристика магістралі визначається таким виразом:

$$H = H_c + RQ^2, \quad (2)$$

де H_c – статичний тиск (протитиск), при $Q = 0$ (закритій засувці); R – коефіцієнт опору магістралі, $R = (H_{ном} - H_c)/Q_{ном}^2$.

Характеристики способів регулювання відцентрового насоса і магістралі наведені на рисунку 1.

Потужність, споживана насосною установкою з мережі

$$P_1 = P_{мex} / \eta_1, \quad (3)$$

де $P_{\text{мех}}$ – потужність на валу двигуна насоса, $P_{\text{мех}} = M_c \omega$; M_c – статичний момент навантаження на валу двигуна; η_1 – КПД двигуна.

Регулювання подачі дросельною заслінкою засноване на зміні опору магістралі. У цьому випадку при $\omega = \omega_{\text{ном}} = \text{const}$ робоча точка механізму переміщається за Q – H -характеристикою, відповідної номінальної швидкості двигуна, у бік зниження подачі до точки перетину з новою характеристикою магістралі (точки, 3 на рис. 1).

При електричному способі регулювання подачі робоча точка переміщається по незмінній характеристиці магістралі (точки, 4, 5, 6, 7 на рис. 1). При цьому із зменшенням подачі зменшується і необхідний тиск, що приводить до зниження статичної потужності, необхідної для роботи насоса із заданою витратою води, в порівнянні з дросельним регулюванням.

При регулюванні дросельною заслінкою, коли $\omega = \omega_{\text{ном}} = \text{const}$, ККД двигуна постійний і обчислюється за формулою $\eta_1 = (1 - S_{\text{ном}}) / (aS_{\text{ном}} + 1)$.

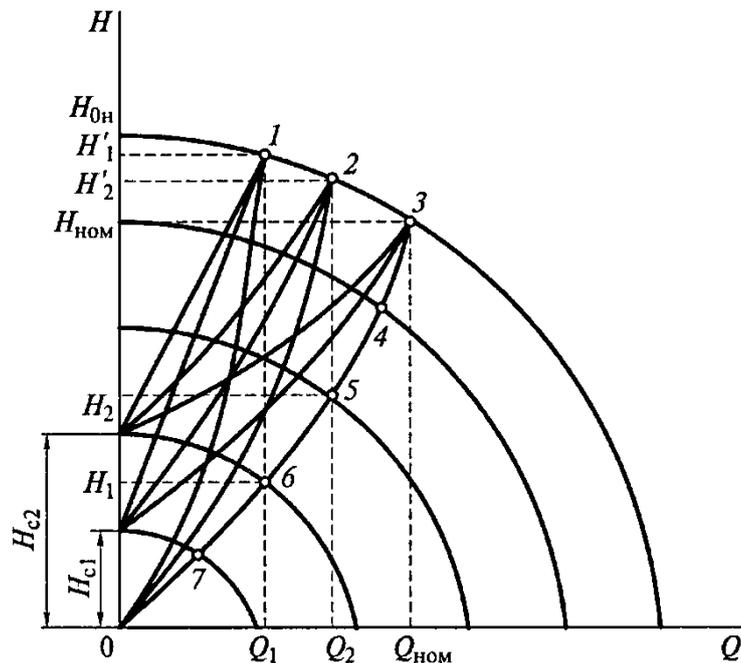


Рис. 1. Характеристики способів регулювання відцентрового насоса:

1, 2, 3 – робочі точки, при дросельному регулюванні подачі; 4, 5, 6, 7 – робочі точки при регулюванні подачі за рахунок зміни частоти обертання двигуна

Щоб отримати розрахункові вирази у функції витрати від ковзання двигуна

$$\eta_1 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{ном}}{\omega} \frac{S_{ном}}{1 - S_{ном}} (1 + a)}, \quad (4)$$

де $S_{ном}$ – номінальне ковзання двигуна; a – відношення активних опорів фази статора R_1 і ротора R'_2 , $a = R_1/R'_2$ можна виразити через витрату. Для цього у формулі (1) замінімо $(\omega/\omega_{ном})^2$ на $[(1-S)/(1-S_{ном})]^2$ і, розв'язавши його спільно з виразом (2) щодо S , отримаємо

$$S = 1 - (1 - S_{ном}) \sqrt{h_c + Q^* (1 - h_c)} = 1 - (1 - S_{ном}) A \quad (5)$$

де $h_c = H_c/H_{0H}$; $Q^* = Q_{ном}$;

$$A = \sqrt{h_c + Q^* (1 - h_c)}.$$

Залежність вираженого у відносних одиницях моменту на валу турбомеханізму при роботі його на мережу з постійними параметрами має вигляд:

$$\mu = \mu_{0c} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2 + (1 - \mu_{0c}) \frac{\omega}{\omega_{ном}} \sqrt{\frac{(\omega/\omega_{ном})^2 - h_c}{1 - h_c}} \quad (6)$$

де μ – відносний момент на валу турбомеханізму, $\mu = M/M_{смах}$ ($M_{смах}$ – максимальний статичний момент на валу механізму, який має місце при $\omega = \omega_{ном}$); μ_{0c} – статичний момент на валу (M_{0c}) при $Q^* = 0$ (закритій засувці), виражений у відносних одиницях, $\mu_{0c} = M_{0c}/M_{смах}$.

Вирази (5) і (6) дозволяють виразити момент, ККД швидкість і потужність, споживану з мережі, у функції від витрати води при заданому протитиску. Для універсального використання розрахункових формул доцільно визначити потужність P_1 у відносних одиницях ($P_1^* = P_1/P_б$), прийнявши як базове значення потужності $P_б$ максимальну статичну потужність на валу двигуна $P_{смах}$ при $\omega = \omega_{ном}$, тобто $P_б = P_{смах} = M_{смах} \omega_{ном}$.

Якщо вважати, що $M_{смах} = M_{ном}$ ($M_{ном}$ – номінальний момент двигуна, $M_{ном} = P_{ном}/\omega_{ном}$), то базова потужність $P_б = P_{ном}$.

Вирази для розрахунку P_1^* при різних способах регулювання подачі насоса приймають такий вигляд:

при дросельному регулюванні:

$$P_{1*} = \frac{[\mu_{0c} + (1 - \mu_{0c})Q_*](1 + aS_{ном})}{1 - S_{ном}} \quad (7)$$

при частотному регулюванні:

$$P_{1*} = [\mu_{0c}A^3 + (1 - \mu_{0c})A^2Q_*] \left[1 + \frac{S_{ном}(1 + a)}{(1 - S_{ном})A} \right]. \quad (8)$$

Вирази (7) і (8) дозволяють розрахувати споживану насосом потужність при дросельному і частотному регулюванні залежно від витрати рідини Q^* і провести порівняльну оцінку для даних способів регулювання. Відповідно з (7) і (8) при дросельному регулюванні для заданого значення Q^* споживана потужність P_{1*} залежить від μ_{0c} , a , $S_{ном}$, а при частотному регулюванні – від h_c , μ_{0c} , a , $S_{ном}$. Задаючи ці параметри для конкретних умов роботи насосного агрегату і вибраного двигуна або відрізка серії двигунів, можна розрахувати значення $P_{1*} = f(Q^*)$.

Для проведення досліджень використовуємо імітаційну модель, яка розроблена ППП "Matlab" / Simulink і показана на рис. 2.

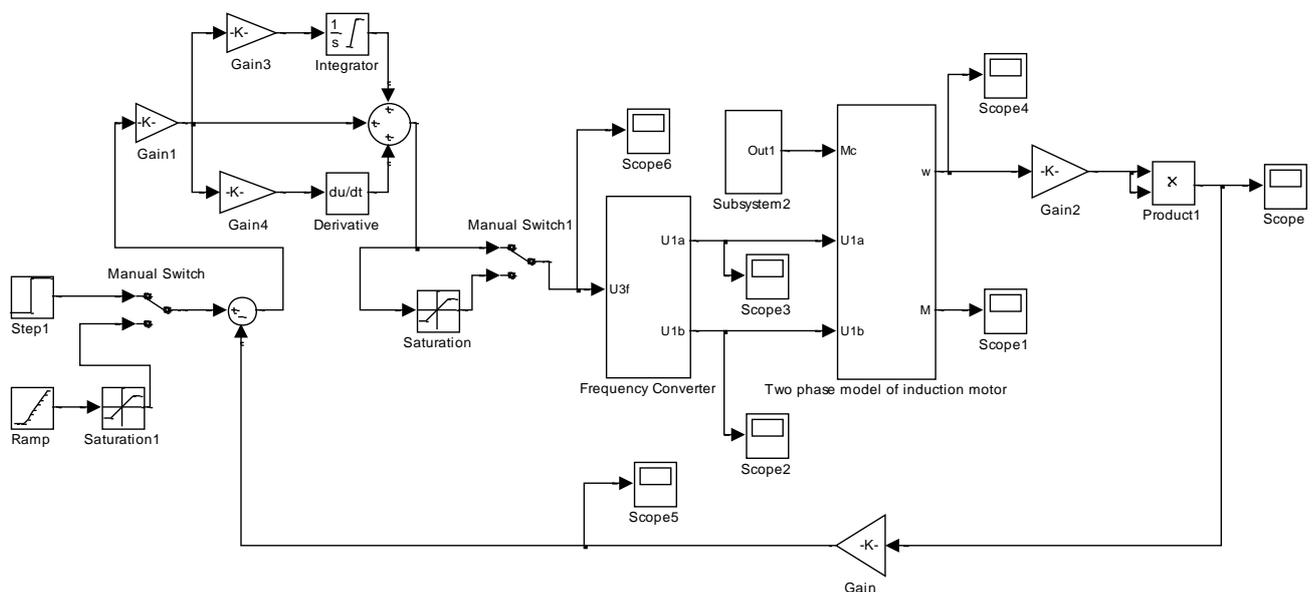


Рис.2 Імітаційна модель насосної установки

Урахування обмеження здійснюється за допомогою блоку Saturation. Тобто для випадку з обмеженням рівень обмеження виставляється на рівень 20.

Перемикачем Manual Switch -1 комутується режим: вхідний сигнал: стрибок - задатчик інтенсивності (лінійне наростання сигналу до заданого рівня); Manual

Switch - 2 включає режим обмеження; Manual Switch - 3 здійснює накидання навантаження.

Модель системи складена з окремих блоків. Кожен блок реалізує певний елемент структурної схеми. Модель містить і інші компоненти, призначені для забезпечення працездатності і візуалізації результатів моделювання.

На рис.3 наведено схему САУ насосної установки з ПІД регулятором і цифровим двійником (Digital Twin)

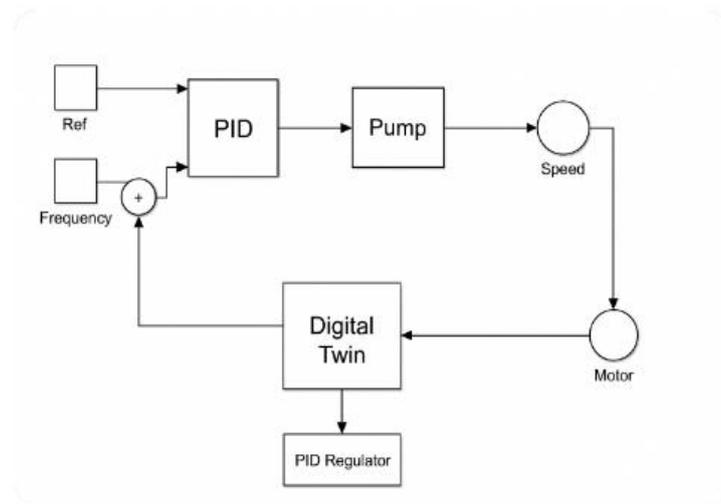


Рис.3. Блок схема САУ насосної установки

На рис. 3 Блок Ref подає сигнал завдання (наприклад тиск або швидкість. Блок Frequency задає поточну частоту перетворювача (VFD). Обидва сигнали підсумовуються у суматорі та утворюють вхід для ПІД-регулятора. Блок PID отримує помилку регулювання $e(t) = R_{ef} - F_{eedback}$ та формує керуючий сигнал на насос / привід.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}, \quad (9)$$

де K_p , K_i , K_d - коефіцієнти налаштування регулятора

ПІД-регулятор керує частотою перетворювача для підтримання потрібного тиску чи швидкості. Блок Pump моделює гідравлічні характеристики насоса: напір, витрату, гідравлічні втрати. Вхідний сигнал від PID визначає швидкість обертання. Блок Motor моделює асинхронний двигун. Вихід насоса подається на Speed — датчик вимірює фактичну швидкість (або тиск). Цей сигнал повертається назад у

контур регулювання як зворотний зв'язок Блок Digital Twin містить паралельну математичну модель привода і насоса, яка отримує ті самі керуючі сигнали, що і реальна система. Його завдання:

- прогноз станів системи;
- оцінювання помилок моделі;
- порівняння реальної та моделюваної динаміки;
- формування корекційного сигналу або рекомендацій щодо налаштування

ПД регулятора.

Основа роботи цифрового двійника $x(t+1) = f[x(t), u(t)]$, де (x) — прогнозований стан, (u) — керуючий сигнал. Блок PID Regulator ПД Digital Twin дає змогу автоматично коригувати параметри ПД-регулятора на основі прогнозу та відхилення між реальною та віртуальною моделлю приводу:

$$\Delta K = K_{\text{model error}}.$$

Результати досліджень та їх обговорення. На основі імітаційної моделі отримали графіки нормалізації тиску (рис.4), швидкості обертання робочого колеса (рис. 5), споживаної потужності (рис. 6).

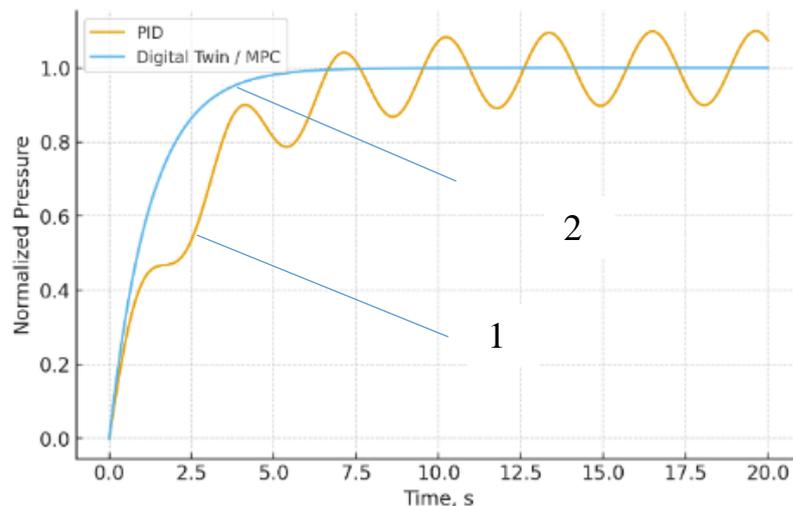


Рис. 4. Графік нормалізації тиску в гідро мережі :
1 - PID – регулятор; 2 – Digital Twin / MPC регулятор.

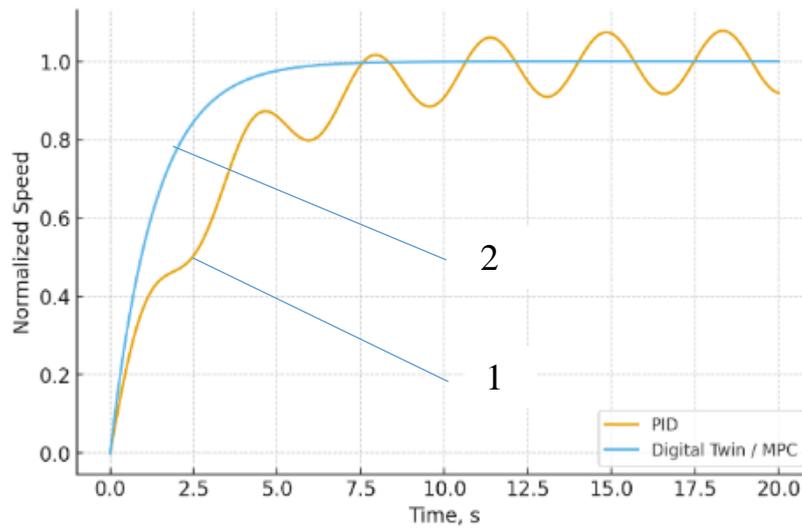


Рис. 5. Графік нормалізації частоти обертання електропривода:
1 - PID – регулятор; 2 – Digital Twin / MPC регулятор

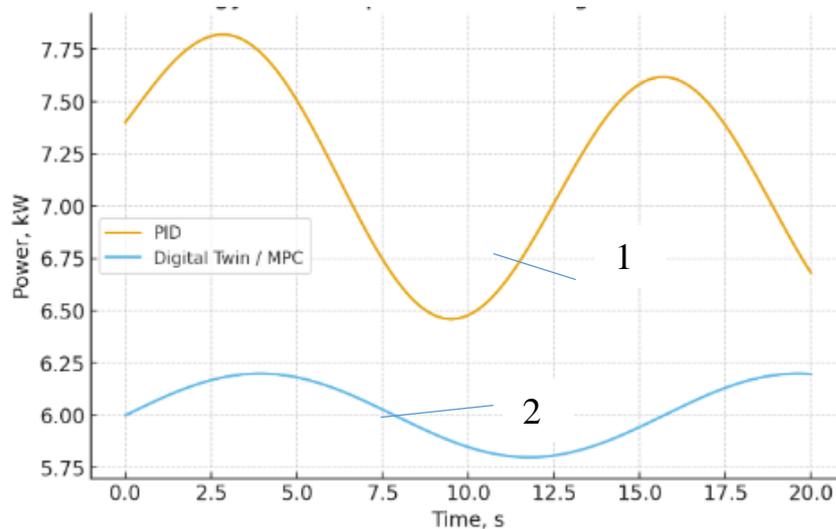


Рис.6. Потужність електропривода з:
1 - PID – регулятором; 2 – Digital Twin / MPC регулятором

Як видно з рис.4 - 5 процес нормалізації технологічних параметрів проходить краще при використанні Digital Twin / MPC регулятора, ніж при самому PID регуляторі, тобто показники якості регулювання кращі, а саме час регулювання менший, що забезпечує більш плавний пуск і менші перерегулювання. PID демонструє перерегулювання до 12 %, а також меншу потужність споживання електропривода (рис. 6), так при PID середня споживана потужність — 7.3 кВт, а MPC середня споживана потужність — 6.4 кВт.

Це дозволяє підвищити енергоефективність: середнє зниження (SE) на 14–22 % порівняно з ПД-регулятором; у нічних «низьких» тарифах — до 27 %; якість регулювання: (IAE) тиску зменшено на 35–50 %, пускові механічні навантаження знижено на 40–60 %; є антикавітаційний ефект.

Таким чином на основі MPC коригуються K_p , K_i , K_d ; система мінімізує перерегулювання; зменшуються енергетичні втрати; PID працює швидше, стабільніше і ефективніше.

$$K_{\text{нов}} = K_p + \Delta K(\text{MPC}). \quad (10)$$

Це забезпечує адаптивне регулювання та покращує динаміку.

Висновки і перспективи. Результати досліджень показують, що:

1. Частотне регулювання суттєво впливає на енергоефективність насосних станцій.
2. Цифрові двійники є ефективним інструментом дослідження і оптимізації.
3. MPC-контролер демонструє кращі показники точності та енергоефективності порівняно з ПД-регулятором.
4. Розроблена модель може бути використана для подальшого вдосконалення систем автоматизації.

Список використаних джерел

1. 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 number 117311. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117311.
2. [Tommaso Capurso](#), [Lorenzo Bergamini](#), [Torresi Marco](#). A new generation of centrifugal pumps for high conversion efficiency. March 2022. [Energy Conversion and Management](#) 256(39):115341. DOI:[10.1016/j.enconman.2022.115341](#)
3. Abidov, K.G., Zaripov, O.O., Khamudkhanova, N.B., Idriskhodjaeva, M.U., & Zaripova, S.O. (2023). Specific features of operating pumping units and the tasks of ensuring energy-saving modes of operation by controlling them. *AIP Conference Proceedings*, 2552(1), article number 030022. doi: [10.1063/5.0112384](#).
4. Moshnoriz, M., Tkachuk, A., Moshnoriz, M., & Gribovskij, O. (2024). Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit. *Machinery & Energetics*, 15(4), 94-105. doi: 10.31548/machinery/4.2024.94.
5. Тетяна Коренькова, Вікторія Ковальчук, Олександр Сердюк, В'ячеслав Прус, Геннадій Риков. Енергоефективна автоматизована система керування частотно-регульованим електроприводом електрогідролічної установки. Електромеханічні і

енергозберігаючі системи. 2023. № 2 (61). С 54-66. DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.2.61.7>

6. Zhou, S.W.; Guo, S.S.; Du, B.G.; Wang, L.; Guo, J.; Li, Y.B.; Peng, Z.; Yu, L. Digital twin model construction method of water treatment plant. *Comput. Integr. Manuf. Syst.* 2023, 29, 1867–1881. [[Google Scholar](#)]

7. Ramos, H.M.; Kuriqi, A.; Besharat, M.; Creaco, E.; Tasca, E.; Coronado-Hernández, O.E.; Pienika, R.; Iglesias-Rey, P. Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks. *Water* 2023, 15, 1129. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

References

1. 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 number 117311. doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117311.

2. [Tommaso Capurso](#) , [Lorenzo Bergamini](#), [Torresi Marco](#). (2022). A new generation of centrifugal pumps for high conversion efficiency. [Energy Conversion and Management](#), 256 (39):115341. DOI:[10.1016/j.enconman.2022.115341](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115341)

3. Abidov, K.G., Zaripov, O.O., Khamudkhanova, N.B., Idriskhodjaeva, M.U., & Zaripova, S.O. (2023). Specific features of operating pumping units and the tasks of ensuring energy-saving modes of operation by controlling them. *AIP Conference Proceedings*, 2552(1), article number 030022. doi: [10.1063/5.0112384](https://doi.org/10.1063/5.0112384).

4. Moshnoriz, M., Tkachuk, A., Moshnoriz, M., & Gribovskij, O. (2024). Efficiency of electric drive of a centrifugal pump unit. *Machinery & Energetics*, 15(4), 94-105. doi: 10.31548/machinery/4.2024.94.

5. Tetyana Korenkova, Viktoriya Kovalchuk, Oleksandr Serdyuk, Vyacheslav Prus, Gennady Rykov (2023). Enerhoefektyvna avtomatyzovana systema keruvannia chastotno-rehulovanym elektroprivodom elektrohivavlichnoi ustanovky [Energy-efficient automated control system for a frequency-controlled electric drive of an electrohydraulic installation]. *Electromechanical and Energy-Saving Systems*, 2 (61), 54-66. DOI <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2023.2.61.7>

6. Zhou, S.W.; Guo, S.S.; Du, B.G.; Wang, L.; Guo, J.; Li, Y.B.; Peng, Z.; Yu, L. (2023). Digital twin model construction method of water treatment plant. *Comput. Integr. Manuf. Syst.*, 29, 1867–1881. [[Google Scholar](#)]

7. Ramos, H.M.; Kuriqi, A.; Besharat, M.; Creaco, E.; Tasca, E.; Coronado-Hernández, O.E.; Pienika, R.; Iglesias-Rey, P. (2023). Smart Water Grids and Digital Twin for the Management of System Efficiency in Water Distribution Networks. *Water* , 15, 1129. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)].

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF FREQUENCY CONTROL METHODS ON THE ENERGY EFFICIENCY OF AN AUTOMATED ELECTRIC DRIVE OF A PUMPING STATION

P. Klendiy, M. Fedirko, V. Kamyshlov, O. Dudar

Abstract. Pumping units are widely used for pumping various liquids, and most of all in water supply and drainage systems. Water consumption is a random function of time

during the day (day, evening, morning) and depends on the season (summer, winter or spring).

The efficiency and cost-effectiveness of cold and hot water supply, heating, drainage and water treatment enterprises of cities, urban and rural areas can be significantly increased through automation and the introduction of regulated electric drives.

The article considers methods for increasing the energy efficiency of an automated electric drive of a pumping station, developed on the basis of a frequency converter using a PID regulator and an MRS controller. Existing technologies for regulating pump performance, such as the use of throttle valves and frequency converters (FCs), are analyzed. To study the impact of frequency regulation with a PID regulator and a digital twin on the energy efficiency of pumping units, a simulation model has been developed in the Matlab application package.

The conducted studies show that the use of frequency control ensures the maintenance of the required technological parameters of the hydro network, reducing energy consumption compared to throttling with an unregulated pump drive, since operation at constant speeds leads to significant energy losses, especially in partial load modes.

The use of an MPC controller allows you to improve the quality of the regulation process compared to a PID regulator, thereby increasing energy efficiency, anti-cavitation effect, and predictive diagnostics of defects reduces unplanned downtime.

The potential for reducing energy consumption and improving the efficiency of pumping stations when using such methods has been assessed. The main advantages and disadvantages of frequency control, as well as the prospects for the development of these technologies in the context of energy saving, have been identified.

Key words: *automated electric drive, water pumping station, frequency control, MPC, digital twin, PID regulator, energy efficiency*