

**О.Ф. Соколовський, к.т.н., доц.**  
*Житомирський військовий інститут ім. С.П.Корольова  
Національного авіаційного університету України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНТЕРАКТИВНОГО КЕРУВАННЯ В НАСОСНІЙ УСТАНОВЦІ НА ОСНОВІ ФІЗИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

*У роботі проведено дослідження інтерактивної електромеханічної системи на основі експериментального спеціалізованого стенда. Дослідження показали, що зміна періоду квантування та коефіцієнта затухання інтерактивного регулятора під час роботи системи не впливають на її стійкість та працездатність. Запропонований спосіб керування забезпечує зниження енерговитрат під час транспортування води до споживачів та не вимагає значних капіталовкладень.*

**Вступ. Постановка проблеми.** Сучасний етап економічного розвитку суспільства вимагає впровадження систем керування насосними установками, які повинні забезпечувати не лише необхідні технологічні параметри напору та витрат води, надійність та енергоефективність транспортування, а також формувати енерго- і ресурсоощадливу поведінку споживачів та проводити моніторинг споживання ресурсів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** При побудові систем автоматичного керування як регульований параметр, зазвичай, використовують тиск на колекторі насосної станції або в диктуючій точці мережі. Стабілізацію тиску на напірному колекторі здійснюють, коли станція розташована поблизу споживачів, наприклад станція підкачування міського (промислового) водопостачання, або коли розрахунками або експериментами встановлена відповідність між змінами тиску в напірному колекторі і диктуючій точці [1, 2, 3]. Можливе водопостачання згідно графіка, що задається таймером [1, 3]. Зменшення продуктивності насосної станції відбувається шляхом закриття засувки на одному із групи паралельно працюючих насосів з наступним відключенням цього насоса за умови, що закриття засувки не призвело до зниження тиску в напірному трубопроводі нижче припустимого рівня. Система автоматичного керування, яка забезпечує водопостачання на основі добової динаміки побутової активності населення [4], змінює частоту обертання насосів (або кількість працюючих насосів), а також тиск у напірній магістралі відповідно до потреби побутових споживачів у воді.

Прогнозування водоспоживання дає можливість побудувати графік роботи насосної установки, максимально наближений до реальних потреб. Чим точніше буде прогноз потреб водоспоживання, тим більшим буде збереження ресурсів. Постійний процес розширення мереж водопостачання та задоволення негайних потреб споживачів ускладнює прогнозування. Методи нечіткої логіки генерують правила прогнозування з бази даних спостерігача, використовуючи статистичну інформацію. При використанні нейронних мереж вхідною інформацією є дані про погоду, навантаження минулої доби та тип дня [5]. Стає можливим передбачити точний прогноз навантаження на годину вперед, що базується на тришарових нейронних мережах, використовуючи для процесу навчання базу даних за останні 30 днів до дня прогнозу та 60 днів до та після дня прогнозу минулого року. Прогнозування може здійснюватися шляхом додавання корекції вибраній базі даних схожого дня.

При екстремальному керуванні (частотне, векторне) автоматично забезпечується статичний режим роботи насоса з максимально можливим ККД при заданих витратах або привідного двигуна з мінімумом сумарних (або активних) втрат потужності. За частотного керування при організації пошуку точки з максимальним ККД насоса [6] робота насосної установки організовується таким чином, щоб забезпечення потреб споживачів здійснювалося при максимально можливих значеннях ККД насоса.

Під час інтерактивного керування відбувається періодична зміна швидкості насоса через фіксовані проміжки часу [7, 8]. Знак зміни швидкості та амплітуда визначається інтерактивним регулятором в результаті обробки сигналів швидкості насоса, продуктивності або напору установки на попередньому та поточному кроках квантування. Як показали дослідження [9], показники економії залежать від характеру водоспоживання протягом доби та прийнятого коефіцієнта затухання. У ході проведення порівняльного аналізу слід враховувати ККД електромеханічних систем в умовах інтерактивного керування та за умови стабілізації напору.

**Постановка завдання. Формулювання цілей статті.** Фактична економія при впровадженні енергозберігаючих заходів в діючих установках визначається, виходячи із кількості спожитої енергії та транспортованої рідини до споживачів за певний період часу (тиждень, місяць, рік) [1]. Тому постає завдання експериментального підтвердження результатів попередніх досліджень інтерактивної електромеханічної системи.

**Основна частина.** У насосних установках найбільшого поширення набули методи витрат рідини за допомогою звужуючих пристроїв в комплекті з диференційними манометрами. Звужуючий пристрій звичайно встановлюють в напірних, інколи у всмоктуючих трубопроводах. Як звужуючі пристрої використовують діафрагми і сопла. При широкому діапазоні вимірів (1:3 і більше) на одному трубопроводі необхідно встановлювати два диференційних манометри, один з яких градуйований на більшій, інший – на малі витрати насосної установки.

Вимірювання витрат без звужуючих пристроїв здійснюється при допомозі індукційних та ультразвукових витратомірів, які забезпечують більш високу точність вимірювання.

Витратоміри необхідно встановлювати на прямих ділянках трубопроводу.

Обов'язковим елементом витратомірів повинні бути лічильні інтегруючі приставки. Наявність таких приставок в поєднанні із лічильниками електроенергії дозволяє досить точно обрахувати фактичні питомі витрати електроенергії:

$$W_{i\dot{o}} = \frac{W_{\Sigma}}{Q_{\Sigma}}, \quad (1)$$

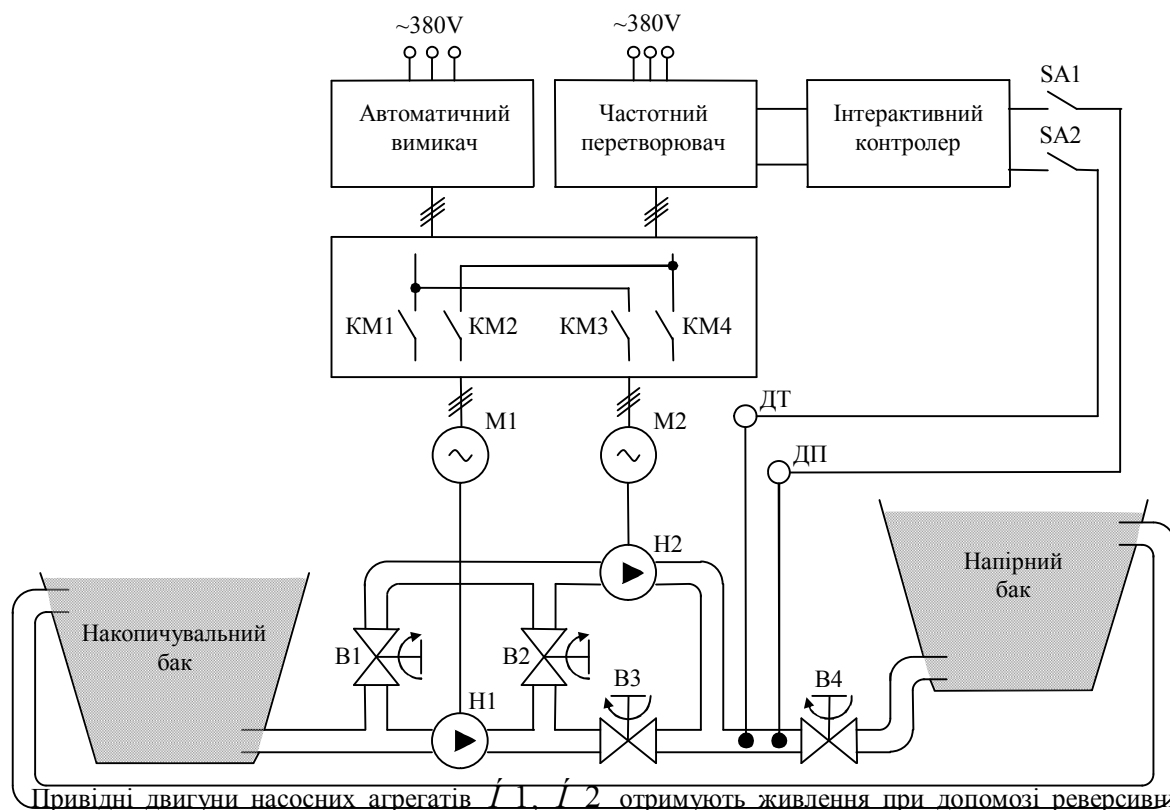
де  $Q_{\Sigma}$  – сумарна подача води за час  $T$ .

Тоді фактична економія електроенергії:

$$W_{ae} = (W'_{i\dot{o}} - W_{i\dot{o}}) Q_{\Sigma}, \quad (2)$$

де  $W'_{i\dot{o}}$  – питомі витрати електроенергії до впровадження енергозберігаючих заходів.

Функціональну схему експериментального стенда для дослідження динаміки взаємовпливу насосів та їх електроприводів в багатоагрегатній установці за інтерактивного керування зображено на рисунку 1.



Привідні двигуни насосних агрегатів  $I1, I2$  отримують живлення при допомозі реверсивних пускачів  $\hat{E}1, 1P\hat{u}\hat{E}1$ . Функціональну схему керування електродвигунами передбачає блокування подачі напруги на один двигун одночасно від перетворювача та мережі, а також заборону одночасного живлення двох двигунів від перетворювача частоти. Для мінімального впливу на мережу та електропривод при зменшенні частоти обертання регульованого насоса до мінімального рівня здійснюється комутація в силовому колі агрегатів – нерегульований агрегат приєднується до перетворювача частоти, що забезпечує підтримання необхідного напору в системі при відключенні другого агрегату. При допомозі перемикачів  $SA1, SA2$  здійснюється вибір сигналу зворотного зв'язку на вході інтерактивного контролера.

Насосна установка може працювати при паралельному та послідовному з'єднанні агрегатів. При відкритих вентилях  $\hat{A}1$ ,  $\hat{A}3$  забезпечується паралельне з'єднання насосів. Для послідовної роботи агрегатів необхідно відкрити вентиль  $\hat{A}2$  та закрити  $\hat{A}1$ ,  $\hat{A}3$ . Опір мережі регулюється ступенем відкриття чи закриття вентиля  $\hat{A}4$ . Пуск системи може здійснюватися по черговим вмиканням агрегатів. Перший агрегат отримує живлення через перетворювач частоти. Вмикання другого агрегату відбувається при досягненні максимальної продуктивності установки. Для обмеження стрибків напору в системі, зменшення впливу пускового струму другий агрегат приєднується до перетворювача частоти, перший агрегат – отримує живлення безпосередньо від мережі.

З метою проведення досліджень одноагрегатної насосної установки вентиля  $\hat{A}1$ ,  $\hat{A}2$  повинні бути закритими. Для реалізації технологічної схеми застосовано насосний агрегат Calpeda MXH 202E, гнучкі трубопроводи, шарові вентиля діаметром 25 мм, дві ємності з технічною водою об'ємом 200 літрів. Одна із ємностей розміщена на висоті 1,5 м для забезпечення статичного напору в системі.

Параметри насоса: номінальна продуктивність  $Q_n = 4,8 \text{ м}^3/\text{год.}$ ; номінальний напір  $H_n = 5,5 \text{ м.}$ ; номінальний коефіцієнт корисної дії  $\eta_n = 0,5$ ; фіктивний напір за нульової продуктивності  $H_{0n} = 22,5 \text{ м.}$ ; номінальна частота обертання  $\omega_n = 306,05 \text{ рад./с.}$ ; фіктивний гідравлічний опір насоса  $a_f = 0,73785 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$ .

Дані привідного двигуна: номінальна потужність  $P_{2n} = 0,33 \text{ кВт.}$ ; синхронна частота обертання  $\omega_0 = 314 \text{ рад./с.}$ ; номінальна напруга  $U_{1n} = 220 \text{ В.}$ ; номінальний струм  $I_{1n} = 1,7 \text{ А.}$ ; номінальна частота  $f_n = 50 \text{ Гц.}$ ; номінальний коефіцієнт потужності 0,8.

Параметри частотного перетворювача ATV-312037N4: номінальна потужність 0,37 кВт, напруги живлення 380–500 В, номінальний струм 2,2 А за напруги 380 В, струм навантаження 1,7 А. Параметри вільнопрограмованого контролера МахуСоп Flexu-S: аналогові або дискретні входи з внутрішнім джерелом живлення – 14 шт.; аналогові виходи (0–10 В, 20 кОм) – 6 шт.; дискретні безпотенціальні виходи (6 А, ~250 В) – 10 шт.; стандартна мова програмування FBD відповідно до стандарту IEC 61161-3.

Дослідження проведено в три етапи. На першому етапі виконано попередні розрахунки з визначенням частоти обертання насосного агрегату при зміні опору мережі на кожному такті квантування. Зміна опору мала довільний характер з врахуванням допустимих значень напору та продуктивності для відповідних частот обертання насоса. Для розрахунків обрано 10 фіксованих проміжків часу. Результати моделювання наведено в таблиці 1. Кількість спожитої електроенергії за вказаний період склала 0,058 кВт/год.

Таблиця 1

## Результати попередніх розрахунків

t	$\omega$ , рад./с	H, м	Q, м <sup>3</sup> /год.	a, м/(м <sup>6</sup> /год. <sup>2</sup> )	W, кВт год.
0T <sub>0</sub>	314,00	22,0	0,82	30,25	0,0031
1T <sub>0</sub>	314,00	22,0	0,82	30,25	0,0031
2T <sub>0</sub>	304,58	20,0	1,26	11,66	0,0043
3T <sub>0</sub>	300,57	18,0	1,88	4,65	0,0058
4T <sub>0</sub>	303,28	17,0	2,33	2,87	0,0068
5T <sub>0</sub>	305,44	17,0	2,41	2,67	0,0070
6T <sub>0</sub>	298,39	14,0	2,93	1,46	0,0070

Закінчення табл. 1

t	$\omega$ , рад./с	H, м	Q, м <sup>3</sup> /год.	a, м/(м <sup>6</sup> /год. <sup>2</sup> )	W, кВт год.
7T <sub>0</sub>	311,58	15,0	3,11	1,39	0,0080
8T <sub>0</sub>	304,89	13,0	3,34	1,03	0,0074
9T <sub>0</sub>	310,86	15,0	3,09	1,41	0,0080

На другому етапі здійснено безпосереднє дослідження інтерактивної електромеханічної системи на стенді з використанням значень напору та продуктивності, отриманих при попередніх розрахунках. Результати дослідження представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

## Результати експериментальних досліджень інтерактивної електромеханічної системи

t	$\omega$ , рад./с	H, м	Q, м <sup>3</sup> /год.	a, м/(м <sup>6</sup> /год. <sup>2</sup> )
0T <sub>0</sub>	314,0	22,0	0,82	30,25
1T <sub>0</sub>	314,0	22,0	0,82	30,25
2T <sub>0</sub>	306,2	20,0	1,37	9,83
3T <sub>0</sub>	303,7	18,1	2,03	4,00
4T <sub>0</sub>	306,4	16,9	2,45	2,59
5T <sub>0</sub>	306,8	17,0	2,46	2,55
6T <sub>0</sub>	297,1	14,1	2,89	1,50
7T <sub>0</sub>	307,5	15,2	2,99	1,51
8T <sub>0</sub>	296,7	13,1	3,10	1,20
9T <sub>0</sub>	298,3	14,9	2,68	1,88

На останньому етапі проведено дослідження електромеханічної системи з ПІ-регулятором напору (табл. 3).

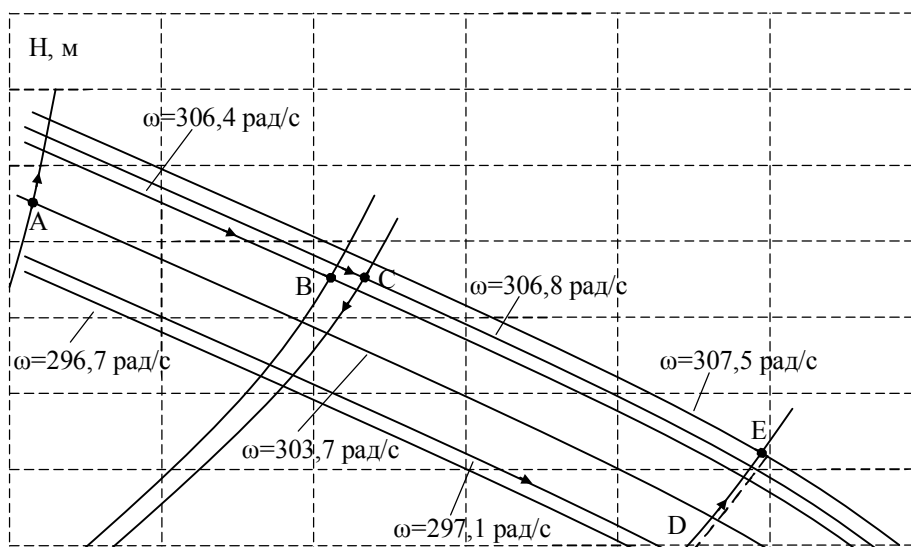
Таблиця 3

*Результати експериментальних досліджень електромеханічної системи з ПІ-регулятором*

t	$\omega$ , рад./с	H, м	Q, м <sup>3</sup> /год.	a, м/(м <sup>6</sup> /год. <sup>2</sup> )
0T <sub>0</sub>	284,7	18	0,82	24,54
1T <sub>0</sub>	284,7	18	0,82	24,35
2T <sub>0</sub>	291,5	18	1,37	8,76
3T <sub>0</sub>	303,7	18	2,03	4,00
4T <sub>0</sub>	313,5	18	2,45	2,75
5T <sub>0</sub>	313,9	18	2,46	2,72
6T <sub>0</sub>	325,3	18	2,89	1,98
7T <sub>0</sub>	328,2	18	2,99	1,85
8T <sub>0</sub>	331,6	18	3,10	1,72
9T <sub>0</sub>	319,6	18	2,68	2,29

Напірні характеристики в умовах інтерактивного керування насосною установкою зображено на рисунку 2. Після пуску системи продуктивність складає 0,82 м<sup>3</sup>/год., величина напору – 22 м. У момент часу 120 с система керування зменшує швидкість насоса. Одразу після цього було збільшено ступінь відкриття вентиля. Зміна опору мережі не призвела до зростання обертів насоса та напору установки на наступному кроці квантування.

Для імітації реакції споживачів вентиль повертається далі в сторону відкриття (точка *A*), що викликає збільшення частоти обертання привідного двигуна на момент 4T<sub>0</sub>. Опір мережі одразу було зменшено (точка *B*) – частота обертання привідного двигуна на наступному кроці знову зростає. Положення вентиля, що відповідає точці *C* спричинить уповільнення швидкості робочого колеса насоса. Чергова зміна опору (точка *D*) призведе до зростання обертів насоса. За відсутності реакції споживачів (точка *E*) відбувається зменшення швидкості насоса. Опір мережі знову було зменшено (точка *F*).



Під час досліджень сигнал на виході датчика тиску не перевищував 20 мА за максимальної частоти обертання насоса. Витрати електроенергії, зафіксовані лічильником, під час застосування енергозберігаючого алгоритму протягом 10 хвилин склали 0,06 кВт/год. Перекачування 360 л, що відповідає об'єму води при попередньому дослідженні, за той же проміжок часу з підтриманням сталого значення тиску в напірній лінії насоса на рівні 1,8 бар призвело до використання 0,067 кВт/год. електроенергії.

**Висновок.** Дослідження на основі експериментального спеціалізованого стенда показали працездатність запропонованої системи. Період квантування повинен перевищувати час перехідних процесів в системі, але не бути занадто великим, щоб не збільшувати час очікування споживачів на бажану зміну витрат води після зміни положення водозапірної арматури. Споживана потужність під час експериментальних досліджень збільшилась на 3,5 % відносно результатів моделювання електромеханічної системи автоматизації насосного агрегату Calpeda MXH 202E. Зменшення частоти обертання насосного агрегату не перевищувало 6 % відносно номінального значення, що забезпечує незначне збільшення втрат в електромеханічному перетворювачі та не призводить до погіршення умов охолодження двигуна. Рівень енергозбереження інтерактивної електромеханічної системи визначається моделлю поведінки споживачів і може змінюватися залежно від вибраного коефіцієнта затухання. Величина економії визначається співвідношенням площ фігур, утворених графіками напору при стабілізації та інтерактивному керуванні з врахуванням ККД всіх елементів силового каналу на відповідних проміжках часу. Результати моделювання доцільно підтвердити на діючій насосній установці системи водопостачання населеного пункту.

#### Список використаної літератури:

1. *Лезнов Б.С.* Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / *Б.С. Лезнов.* – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. *Попович М.Г.* Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи : навч. посіб. / *М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков.* – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
3. *Аршенский Н.Н.* Переходные процессы крупных насосных станций / *Н.Н. Аршенский, Б.Б. Поспелов.* – М. : Энергия, 1980. – 111 с.
4. Пат. України № 68448, 16.08.2004. Система управління насосною станцією міської системи водопостачання / *О.М. Ольшевський, С.О. Сергеев, В.Д. Колотило.*
5. "One-Hour-Ahead Load Forecasting Using Neural Network", IEEE Trans. Power Syst. / *T.Senju, H.Takara, K.Uezato, T.Funabashi.* – Vol.17, no.1. – 2002. – Pp. 113–118.
6. *Popovich M.* Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series / *M. Popovich, O. Kiselychnyk, S. Buryan* // Transactions of Kremenchuk State University. Kremenchuk : KSU, N3/2010 (62), part 2. – 2010. – Pp. 37–41.
7. *Соколовський О.Ф.* Енергозбереження в багатоагрегатних насосних установках / *О.Ф. Соколовський* // Вісник ЖЖТУ. – Житомир, 2008. – Вип. 1 (44). – С. 102–108.
8. *Попович М.Г.* Особливості інтерактивного керування в насосних установках / *М.Г. Попович, О.І. Кіселичник, О.Ф. Соколовський* // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2008. – № 4 (47). – С. 174–179.

9. Соколовський О.Ф. Електромеханічні системи автоматизації багатоагрегатних насосних установок при енерго- та ресурсощадливому керуванні : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 "Електротехнічні комплекси і системи" / Олег Феліксович Соколовський. – К., 2009. – 20 с.

СОКОЛОВСЬКИЙ Олег Феліксович – доцент кафедри спеціальних систем, кандидат технічних наук Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Державного університету телекомунікацій.

Наукові інтереси:

– енергозбереження в системах автоматизованого електропривода;

– дослідження електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками.

Тел.: (097)578-77-54.

E-mail: of@ukr.net.

Стаття надійшла до редакції 24.04.2013

**Соколовський О.Ф.** Дослідження ефективності інтерактивного керування в насосній установці на основі фізичного моделювання

**Соколовский О.Ф.** Исследование эффективности интерактивного управления в насосных установках на основе физического моделирования

**Sokolovsky O.F.** Research of efficiency interactive control in pumps installations based on physical modeling

УДК 62-83:628.12

**Оценка эффективности интерактивного управления в насосных установках на основе экспериментальных исследований / О.Ф. Соколовский**

В работе проведено исследование интерактивной электромеханической системы на основе экспериментального специализированного стенда. Исследования показали, что изменение периода квантования и коэффициента затухания интерактивного регулятора при работе системы не влияют на ее устойчивость и работоспособность. Предложенный способ управления обеспечивает снижение энергозатрат при транспортировке воды к потребителям и не требует значительных капиталовложений.

УДК 62-83:628.12

**Research of efficiency interactive control in pumps installations based on physical modeling / O.F. Sokolovsky**

In this paper it has been researched the interactive electromechanical automatic control system, based on experimental specialized stand. The researchers showed, that changing the period of quantization and attenuation coefficient of interactive regulator during while the system runs, does not influence on its stability and efficiency. The proposed control method provides the reduction of power consumption during the transportation of water to the users and doesn't require significant investments.