

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

ВПЛИВ ДОБОВОЇ НЕРІВНОМІРНОСТІ СПОЖИВАННЯ ВОДИ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ІНТЕРАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Використання інтерактивної електромеханічної системи автоматизації насосної установки забезпечує зниження енерговитрат при транспортуванні води до споживачів. В умовах змінного характеру водоспоживання протягом доби можливе зниження енергоефективності системи. У роботі досліджено вплив інтерактивного керування на рівень споживаної потужності з врахуванням добової нерівномірності попиту на воду. Зменшення величини коефіцієнта затухання забезпечує зниження енерговитрат для різних моделей поведінки споживачів.

Вступ. Розробка енергоефективних технологій є однією із найважливіших умов сучасного технічного розвитку. Зменшення витрат електричної енергії може бути досягнуто за рахунок вдосконалення сучасних електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками на основі електропривода з перетворювачами частоти.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Збільшення рівня енергозбереження насосних установок досягається за рахунок систем стабілізації, програмного керування, екстремальних систем [1, 2]. В умовах інтерактивного керування відбувається періодична зміна швидкості насоса через фіксовані проміжки часу [3–5]. Знак зміни швидкості та амплітуда визначаються інтерактивним регулятором у результаті обробки сигналів швидкості насоса, продуктивності або напору установки на попередньому та поточному кроках квантування. Як відомо, процес керування в ігрових системах виконується у взаємодії з багатьма об'єктами, інтереси сторін є протилежними, дії сторін і збурень можуть мати випадковий характер [6]. Збурення в інтерактивній системі формується внаслідок зміни гідравлічного опору споживачами. Тому важливо розглянути характер реагування системи на зміну попиту споживачами, який залежить також від періодичних пропозицій водозабезпечення з боку самої системи.

Постановка завдання. При дослідженні сучасних систем керування насосними установками недостатня увага приділена впливу добової нерівномірності споживання води. Метою роботи є визначення впливу поведінки споживачів на енергоефективність інтерактивної електромеханічної системи.

Викладення основного матеріалу. Математична модель інтерактивного регулятора, який реалізує енергозберігаючий алгоритм, побудована на основі виразу [4]:

$$\omega_{ai}((n+1)T_0) = \frac{k\sqrt{H((n-1)T_0)}}{\sqrt{H(nT_0) + c}} \cdot \frac{\omega_{ai}^2(nT_0)}{\omega_{ai}((n-1)T_0) + c}, \quad (1)$$

де T_0 – період квантування інтерактивного регулятора; k – коефіцієнт затухання, який забезпечує зниження швидкості насоса за відсутності зміни гідравлічного опору мережі ($k < 1$); $H((n-1)T_0)$ – напір насосної установки на попередньому кроці квантування; $H(nT_0)$ – напір насосної установки на поточному кроці квантування; $\omega_{ai}(nT_0)$ – швидкість електропривода на поточному кроці квантування; $\omega_{ai}((n-1)T_0)$ – швидкість електропривода на попередньому кроці квантування; c – стала величина для уникнення ділення на нуль.

Розглянемо роботу інтерактивної електромеханічної системи автоматизації насосної установки. Напірні характеристики (рис. 1, а) відповідають частоті обертання насоса $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5$. Початковий режим визначається точкою А, насос працює зі швидкістю ω_1 установка створює напір $H = H_A$. У момент часу $2T_0$ формується сигнал керування на виході інтерактивного регулятора з врахуванням: $\omega(nT_0) = \omega_1$; $H(nT_0) = H_A$; $H((n-1)T_0) = H_A$. При цьому швидкість зменшується до значення ω_2 (точка В). Далі система реагує на потреби споживачів. Збільшення витрат води призведе до зростання частоти обертання регульованого насоса у момент часу $3T_0$ (точки С, D). Миттєві значення сигналів на момент $3T_0$: $\omega(nT_0) = \omega_2$;
 $\omega((n-1)T_0) = \omega_1$; $H(nT_0) = H_C$; $H((n-1)T_0) = H_A$.

Із графіків видно, що збільшення швидкості не призвело до значного зростання напору. Тому споживачі далі зменшують гідравлічний опір (точка К), що призводить до зростання швидкості у момент часу $4T_0$. Надалі режим роботи буде визначатися точкою L. Якщо на наступному проміжку часу T_0 водоспоживання не зміниться, регулятор створить сигнал керування на основі даних: $\omega(nT_0) = \omega_4$; $\omega((n-1)T_0) = \omega_3$; $H(nT_0) = H_L$; $H((n-1)T_0) = H_K$.

У випадку стабілізації напору (рис. 1, б) збільшення водоспоживання за аналогічних умов

призводить до зростання швидкості робочого колеса насоса, що забезпечує сталі значення тиску в системі.

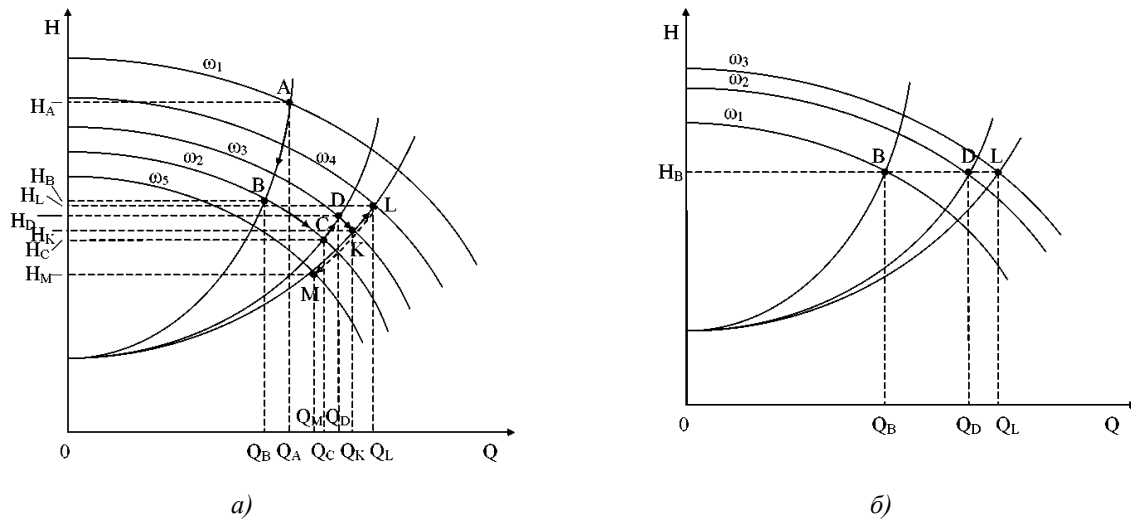


Рис. 1. Напірні характеристики насосної установки та характеристики мережі

Моделювання роботи інтерактивної електромеханічної системи проведемо з врахуванням добової нерівномірності споживання води. Попит на воду вранці та ввечері зростає, у нічний час – тримається на мінімальному рівні, вдень – має відносно стабільні показники. Зважаючи на змінний характер водоспоживання, розглянемо три моделі поведінки споживачів: Π_1 – відносно стабільний попит на воду, коли зміна напору системи має коливальний характер із різною періодичністю; Π_2 – високий рівень водоспоживання в піковий період доби; Π_3 – запити на зростання напору формуються із певним запізненням.

У випадку відносно стабільного попиту на воду можна передбачити, що зміна напору системи носитиме коливальний характер із різною періодичністю. Тенденція зміни швидкості електропривода на десяти кроках квантування інтерактивного регулятора буде мати такий характер:

$$\ddot{I}_1 = \left(\begin{array}{l} \omega_1 = \omega_{\max} \\ \omega_2 = \omega_{\max} \\ \omega_6 < \omega_3 (\downarrow) < \omega_3 \\ \omega_3 < \omega_4 (\uparrow) < \omega_4 \\ \omega_4 < \omega_5 (\uparrow) < \omega_1 \\ \omega_9 < \omega_6 (\downarrow) < \omega_4 \\ \omega_8 < \omega_7 (\downarrow) < \omega_9 \\ \omega_{10} < \omega_8 (\downarrow) < \omega_7 \\ \omega_7 < \omega_9 (\uparrow) < \omega_6 \\ \omega_{10} (\downarrow) = \omega_{\min} \end{array} \right)$$

При зменшенні напору системою керування в піковий період доби споживачі намагатимуться відновити рівень водоспоживання. Таким чином, зменшення частоти обертання насоса на попередньому періоді квантування призведе до зростання напору на наступному кроці роботи системи:

$$\ddot{I}_2 = \begin{pmatrix} \omega_1 = \omega_{\max} \\ \omega_2 = \omega_{\max} \\ \omega_6 < \omega_3 (\downarrow) < \omega_9 \\ \omega_{10} < \omega_4 (\uparrow) < \omega_1 \\ \omega_7 < \omega_5 (\downarrow) < \omega_6 \\ \omega_5 < \omega_6 (\uparrow) < \omega_3 \\ \omega_7 (\downarrow) = \omega_{\min} \\ \omega_9 < \omega_8 (\uparrow) < \omega_{10} \\ \omega_3 < \omega_9 (\downarrow) < \omega_8 \\ \omega_8 < \omega_{10} (\uparrow) < \omega_4 \end{pmatrix}$$

Якщо мережа не потребує підтримання стабільного водозабезпечення, то реакція споживачів буде характеризуватися запитами на зростання напору із певним запізненням:

$$\ddot{I}_3 = \begin{pmatrix} \omega_1 = \omega_{\max} \\ \omega_2 = \omega_{\max} \\ \omega_4 < \omega_3 (\downarrow) < \omega_5 \\ \omega_7 < \omega_4 (\downarrow) < \omega_3 \\ \omega_3 < \omega_5 (\uparrow) < \omega_6 \\ \omega_5 < \omega_6 (\uparrow) < \omega_9 \\ \omega_8 < \omega_7 (\downarrow) < \omega_4 \\ \omega_8 (\downarrow) = \omega_{\min} \\ \omega_6 < \omega_9 (\uparrow) < \omega_{10} \\ \omega_9 < \omega_{10} (\uparrow) < \omega_1 \end{pmatrix}$$

Для визначення рівня енергоефективності інтерактивної електромеханічної системи проведемо порівняння з поширеною системою стабілізації напору. Відносна економія електроенергії при застосуванні інтерактивного керування відносно системи стабілізації напору за умови однакової продуктивності на відповідних проміжках часу [5]:

$$E_W = 1 - \frac{\sum_1^N \left(\frac{\lambda_{\ddot{E}\ddot{A}^3} \eta_{\ddot{P}^2}}{\sum_1^N \left(\frac{\lambda_{\ddot{E}\ddot{A}^3} \eta_{\ddot{E}\ddot{A}^3}}{\ddot{P}^2} \right)} \right)}{\sum_1^N \left(\frac{\lambda_{\ddot{E}\ddot{A}^3} \eta_{\ddot{E}\ddot{A}^3}}{\ddot{P}^2} \right)}, \quad (2)$$

де $N_{\text{ПІ}}$, $N_{\text{АЛГ}}$ – напір на фіксованих інтервалах часу при стабілізації тиску та в умовах застосування енергозберігаючого алгоритму; $\eta_{\text{ПІ}}$, $\eta_{\text{АЛГ}}$ – ККД електромеханічних систем відповідно до ПІ-регуляторів та при інтерактивному керуванні.

Для дослідження використаємо програму Win CAPS фірми Grundfos [7]. Вона дозволяє визначити основні параметри насосної установки для будь-яких точок у межах робочої області. За каталогом фірми Grundfos оберемо насосну установку CRE-20-3 з вбудованим перетворювачем частоти.

Параметри насосної установки: номінальна продуктивність $Q_{\text{ном}} = 21,0 \text{ м}^3/\text{год.}$; номінальний напір $H_{\text{ном}} = 34,6 \text{ м.}$; номінальний ККД $\eta_{\text{ном}} = 0,593$; номінальна частота обертання $\omega_{\text{ном}} = 305,31 \text{ рад./с.}$; номінальна потужність привідного двигуна $P_{2\text{ном}} = 4,0 \text{ кВт.}$

Величина статичного напору під час досліджень буде становити 10 м, стабілізація напору здійснюватиметься на рівні 35 м. Початковий гідравлічний напір мережі $a = 0,55 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$. Швидкість електропривода на кожному наступному кроці квантування визначається згідно з виразом (1). Дослідження проведемо для трьох значень коефіцієнта згасання: $k_1 = 0,96$; $k_2 = 0,97$; $k_3 = 0,98$.

В таблиці 1 наведено результати досліджень при коефіцієнті згасання 0,96 та відносно стабільному попиту на воду.

Таблиця 1

Результати досліджень інтерактивної електромеханічної системи

| № інтервалу | Q, м ³ /год. | ω _{алг} , % | ω _{пі} , % | H _{алг} , м | a, м/(м ⁶ /год. ²) | η _{алг} | η _{пі} |
|-------------|-------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---|------------------|-----------------|
| 1 | 10,00 | 100 | 91 | 42,40 | 0,55 | 0,481 | 0,491 |
| 2 | 8,65 | 99 | 91 | 42,40 | 0,55 | 0,554 | 0,461 |
| 3 | 17,00 | 95 | 96 | 34,60 | 0,12 | 0,579 | 0,579 |
| 4 | 20,74 | 98 | 100 | 33,00 | 0,07 | 0,591 | 0,593 |
| 5 | 18,65 | 98 | 98 | 35,00 | 0,10 | 0,590 | 0,590 |
| 6 | 15,43 | 91 | 94 | 32,00 | 0,13 | 0,570 | 0,569 |
| 7 | 12,92 | 85 | 93 | 29,10 | 0,17 | 0,546 | 0,540 |
| 8 | 19,53 | 81 | 99 | 21,00 | 0,05 | 0,556 | 0,592 |
| 9 | 19,03 | 87 | 98 | 25,50 | 0,07 | 0,578 | 0,591 |
| 10 | 14,93 | 79 | 94 | 24,00 | 0,10 | 0,565 | 0,564 |

Графічні представлення трендів спожитої електроенергії інтерактивною системою від опору мережі та напору при моделюванні поведінки П₁ і коефіцієнті згашення 0,96 наведено відповідно на рисунках 2, а та б. Графіки побудовані для періоду квантування T₀ = 60 с. Економія електроенергії за зазначених умов склала 10,6 %. Зростаючі ділянки залежності W = f(a), W = f(H) відповідають режиму, при якому напір установки в результаті реакції споживачів на наступному кроці квантування регулятора збільшився у відповідь на зростання швидкості насоса, спадаючі пояснюються зменшенням напору споживачами при збільшенні частоти обертання привідного двигуна.

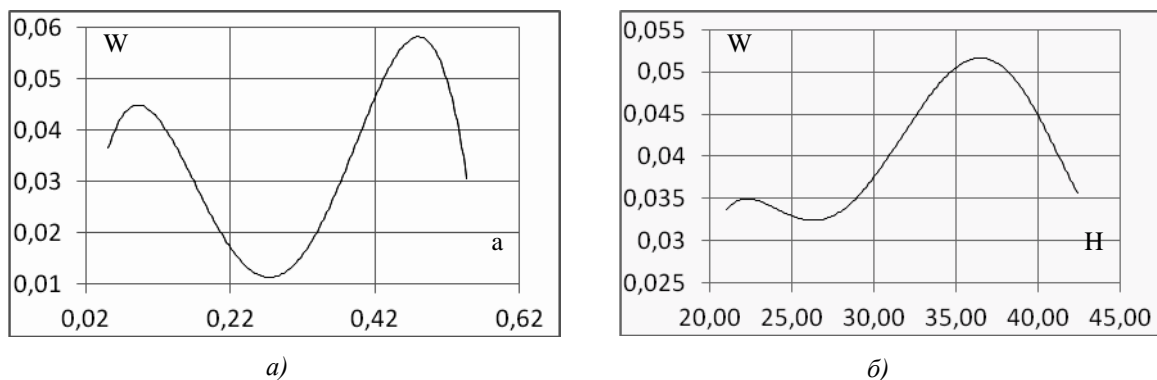


Рис. 2. Лінії тренда спожитої електроенергії при дослідженні інтерактивної електромеханічної системи автоматизації насосної установки

Рівняння ліній тренда спожитої електроенергії інтерактивною системою від опору мережі та напору:

$$W_a = -28,231a^4 + 31,846a^3 - 11,345a^2 + 1,3676a - 0,0077;$$

$$W_H = 2 \cdot 10^{-7} \cdot H^5 - 3 \cdot 10^{-5} \cdot H^4 + 2 \cdot 10^{-3} \cdot H^3 - 6,08 \cdot 10^{-2} \cdot H^2 + 9,139 \cdot 10^{-1} \cdot H - 5,344.$$

Для визначення оптимального значення коефіцієнта згашення побудуємо платіжну матрицю, де у стовпцях відображені значення економії електроенергії при трьох варіантах поведінки системи П_i, а у рядках – економія при певних коефіцієнтах згашення k_i (табл. 2).

Таблиця 2

Платіжна матриця

| П _i | П ₁ | П ₂ | П ₃ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| k _i | | | |
| 0,96 | 10,60 | 11,35 | 11,40 |
| 0,97 | 5,91 | 5,22 | 6,47 |

| | | | |
|------|------|------|-------|
| 0,98 | 2,07 | 0,24 | -1,75 |
|------|------|------|-------|

Як видно із таблиці 2 зменшення коефіцієнта затування сприяє зростанню енергоефективності установки за різних моделей поведінки споживачів.

Висновок. Регулювання рівня енергозбереження в інтерактивних системах залежить від величини коефіцієнта затування. При малих значеннях коефіцієнта затування відбувається інтенсивна зміна швидкості на кожному кроці квантування як за відсутності реакції споживачів, так і при адекватному зростанні попиту на воду в умовах зниження рівня водопостачання. При наближенні коефіцієнта затування до одиниці, завдяки зменшенню чутливості інтерактивного контролера, система реагує плавною зміною обертів на зміни опору мережі. Значення коефіцієнта затування необхідно обирати на основі компромісних умов створення певного рівня комфорту для споживачів та забезпечення прийняттого рівня енергозбереження.

Характер розбору води споживачами впливає на енергоефективність інтерактивної електромеханічної системи, але не змінює тенденцію витрат електроенергії, яка визначається величиною коефіцієнта затування. За відносно стабільного попиту на воду рівень економії електроенергії має найвищі показники. В умовах високого рівня водоспоживання в піковий період доби система характеризується середніми показниками енергоефективності. Якщо запити на зростання напору формуються із певним запізненням, то енергоспоживання коливається в найбільшому діапазоні.

Інтерактивне керування забезпечує незалежність процесу регулювання технологічних параметрів від необхідності їх стабілізації, що дозволяє використовувати насосну установку в усьому робочому діапазоні допустимих напорів та забезпечує суттєве зниження споживання електроенергії.

Список використаної літератури:

1. *Kiselychnyk O.* Overview of energy efficient control solutions for water supply systems / *O.Kiselychnyk, M.Bodson, H.Werner* // Transactions of Kremenchuk State Polytechnic Univ. Kremenchuk : KSPU, N3/2009 (56). – Part 1. – 2009. – Pp. 40–45.
2. *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.
3. *Соколовський О.Ф.* Енергозбереження в багатоагрегатних насосних установках / *О.Ф. Соколовський* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – Житомир, 2008. – Вип. 1 (44). – С. 102–108.
4. *Попович М.Г.* Особливості інтерактивного керування в насосних установках / *М.Г. Попович, О.І. Кіселичник, О.Ф. Соколовський* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – Житомир, 2008. – Вип. 4 (47). – С. 174–179.
5. *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» / *О.Ф. Соколовський*. – К., 2009. – 20 с.
6. *Попович М.Г.* Теорія автоматичного керування / *М.Г. Попович, О.В. Ковальчук* – К. : Либідь, 2007. – 656 с.
7. Grundfos – WinCAPS версія 2010.01, CD.

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

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 31.10.2012