

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

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ ПРИ ЗМІШАНОМУ З'ЄДНАННІ АГРЕГАТІВ В УМОВАХ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО КЕРУВАННЯ

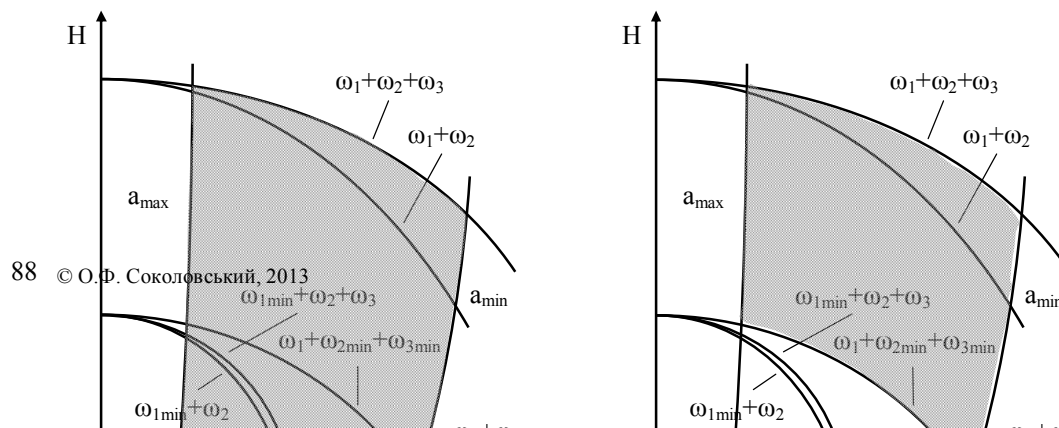
У роботі проведено дослідження електромеханічної системи в умовах енергозберігаючого керування при змішаному з'єднанні агрегатів. Визначено особливості керування багатоагрегатними насосними установками. Незалежно від комбінації застосованих електроприводів працездатність системи не порушується, реакція системи на запити споживачів має адекватний характер.

Постановка проблеми. Впровадження методів керування, що забезпечують необхідну якість водопостачання та ефективність використання електричної енергії, за різних технологічних схем побудови насосних станцій та мережі, є одним із пріоритетних напрямків сучасного технічного розвитку. Значний економічний ефект може бути досягнутий за рахунок вдосконалення сучасних електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками комунальних підприємств водопостачання на основі електропривода з перетворювачами частоти. Підвищення енергетичної ефективності електромеханічних систем вимагає впровадження алгоритмів керування з урахуванням взаємовпливу насосів та їх привідних двигунів за різних схем з'єднання агрегатів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У сучасних системах водопостачання застосовують насосні установки з паралельним, послідовним та змішаним вмиканням агрегатів. За паралельного (каскадного) вмикання агрегатів розрізняють насосні установки типу F та E [1, 2]. Насосні установки типу F мають один регульований насос із частотним приводом. Двигуни інших насосів вмикаються безпосередньо в мережу змінного струму і працюють з постійною частотою обертання. Насосні установки типу E обладнані всіма регульованими агрегатами. Алгоритм роботи таких установок відрізняється тим, що після увімкнення наступного насоса оберти всіх увімкнених до цього насосів вирівнюються, після цього оберти насосів змінюються синхронно до досягнення заданого значення необхідного напору. Комбінація різноманітних способів з'єднання агрегатів дає можливість отримати характеристику насосної установки, що задовольняє технологічним вимогам для конкретної мережі. Збільшення рівня енергозбереження насосних установок, порівняно із поширеними системами стабілізації напору можна досягти за рахунок програмного керування, екстремальних систем [3, 4]. За інтерактивного керування [5, 6] система реагує на тенденцію водоспоживання і через фіксовані проміжки часу формує сигнал завдання швидкості регульованого електропривода. Знак зміни швидкості та амплітуда визначається інтерактивним регулятором у результаті обробки сигналів швидкості насоса, продуктивності або напору установки на попередньому та поточному кроках квантування.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження електромеханічної системи при змішаному з'єднанні агрегатів та визначення працездатності інтерактивного керування за різних комбінацій застосованого електропривода.

Викладення основного матеріалу. Для об'єктивного порівняння різних комбінацій електроприводів за змішаного з'єднання агрегатів розглянемо особливості напірних характеристик насосних установок (рис. 1). Характеристики a_{\min} та a_{\max} відповідають найменшому та найбільшому значенням опору мережі. Напірні характеристики за частот обертання ω_1 , ω_2 , ω_3 належать, відповідно, послідовно включеному та двом паралельно з'єднаним агрегатам, за мінімальної частоти обертання характеристики позначені $\omega_{1\min}$, $\omega_{2\min}$, $\omega_{3\min}$. Всі агрегати обладнано насосами з однаковими напірними характеристиками. При застосуванні трьох регульованих агрегатів межі регулювання зображені на рисунку 1, а. Допустимий діапазон у випадку застосування двох регульованих паралельних агрегатів позначений на рисунку 1, б. Як бачимо з графіків, за відсутності регульованого електропривода одного з насосів робочий діапазон установки значно зменшується.



На рисунку 2 зображено функціональну схему насосної установки із застосуванням інтерактивного регулятора, який через фіксовані проміжки часу формує сигнал завдання $U_{эф}$ швидкості електроприводів насосів 2, 3 відповідно до запитів мережі. Засувки 31, 32 слугують для попередження руху води в протилежному напрямку при відключенні відповідного агрегату. Датчик ДТ забезпечує сигнал зворотного зв'язку за напором на вході інтерактивного контролера.

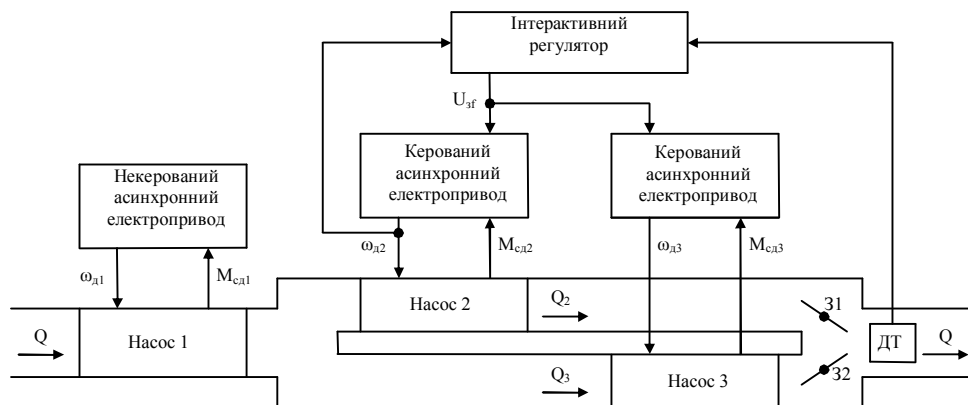


Рис. 2. Функціональна схема інтерактивної електромеханічної системи
 Математичну модель насосної установки побудовано на основі еквівалентної схеми заміщення, яку отримано при апроксимації параболічних характеристик насоса та гідравлічної мережі в усталеному режимі нелінійними диференціальними рівняннями першого порядку [5].

Система рівнянь, що описує математичну модель:

$$H_{1зм} = H_{01зм} - a_{\phi 1зм} Q^2 \quad (1)$$

$$H_{2\phi i} = H_{02\phi i} - a_{\phi 2\phi i} Q_2^2 - L_{\phi 2\phi i} \dot{Q}_{2\phi i}; \quad (2)$$

$$H_{2зм} = H_{03зм} - a_{\phi 3зм} Q_{3зм}^2 - L_{\phi 3зм} \dot{Q}_{3зм} \quad (3)$$

$$H = H_{cm} + aQ^2 + L_{зм} \dot{Q} \quad (4)$$

$$L_{\phi 2зм} = \frac{m_{2зм}}{\rho g S^2} \quad (5)$$

$$L_{\phi 33M} = \frac{m_{33M}}{\rho g S^2}; \quad (6)$$

$$L_{3M} = \frac{m_{3M}}{\rho g S^2}; \quad (7)$$

$$Q = Q_{23M} + Q_{33M} \quad (8)$$

$$M_{c13M} = \frac{QH_{13M}\rho g}{\eta_{13M}\omega_{13M}}; \quad (9)$$

$$M_{c2} = \frac{Q_{23M}H_{23M}\rho g}{\eta_{23M}\omega_{23M}}; \quad (10)$$

$$M_{c3} = \frac{Q_{33M}H_{23M}\rho g}{\eta_{33M}\omega_{33M}}; \quad (11)$$

$$H_{013M} = k_H \omega_{13M}^2; \quad (12)$$

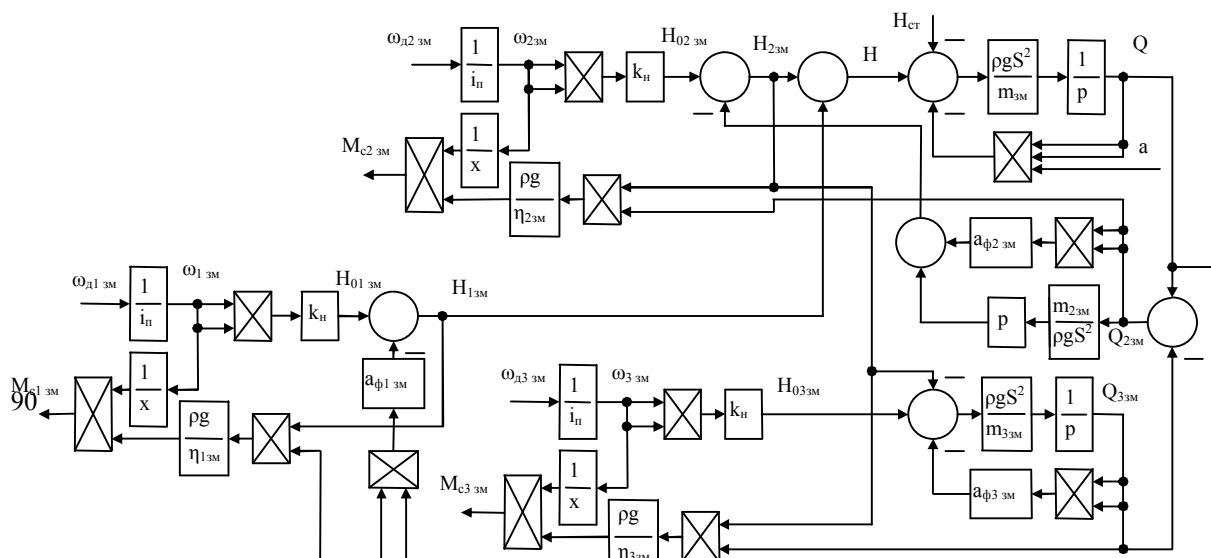
$$H_{023M} = k_H \omega_{23M}^2; \quad (13)$$

$$H_{033M} = k_H \omega_{33M}^2; \quad (14)$$

де H_{13M} – напір послідовно з'єднаного насоса; H_{23M} – напір паралельно з'єднаних насосів; H – напір насосної установки; H_{013M} – фіктивний напір послідовно з'єднаного насоса; H_{023M} , H_{033M} – фіктивні напори паралельно з'єднаних насосів; $H_{\text{нб}}$ – статичний напір мережі; Q – продуктивність насосної установки; Q_{23M} , Q_{33M} – продуктивність паралельно з'єднаних насосів; a – гідравлічний опір мережі; $a_{\phi 13M}$ – фіктивний гідравлічний опір послідовно з'єднаного насоса; $a_{\phi 23M}$, $a_{\phi 33M}$ – фіктивні гідравлічні опори паралельно з'єднаних насосів; L_{3M} – фіктивна індуктивність мережі та послідовно з'єднаного насоса; $L_{\phi 23M}$, $L_{\phi 33M}$ – фіктивні індуктивності паралельно з'єднаних насосів; S – площа поперечного перерізу трубопроводу; m_{3M} – маса води в трубопроводі мережі та послідовно з'єднаному насосі; m_{23M} , m_{33M} – маса води в паралельно з'єднаних насосах; ω_{13M} – частота обертання послідовно з'єднаного насоса; ω_{23M} , ω_{33M} – частоти обертання паралельно з'єднаних насосів; η_{13M} – ККД послідовно з'єднаного насоса; η_{23M} , η_{33M} – ККД паралельно з'єднаних насосів; M_{c13M} – момент опору на валу послідовно з'єднаного насоса; M_{c23M} , M_{c33M} – момент опору на валах паралельно з'єднаних насосів.

Опис асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором здійснюється за допомогою двофазової моделі в системі координат a-b. З метою спрощення процедури досліджень сумарний момент інерції на валу двигуна прийнято рівним моменту інерції ротора.

Структурну схему насосної установки наведено на рисунку 3. Якщо один паралельний агрегат вивести з роботи, то установка працюватиме з двома послідовними агрегатами. Застосування зворотного зв'язку за напором при послідовній роботі агрегатів вимагає врахування особливостей даного способу з'єднання. Із практики відомо, що в процесі регулювання послідовних агрегатів за принципом стабілізації напору можливе виникнення резонансних явищ у гідравлічній мережі [7]. Це пов'язано з розміщенням датчиків тиску в напірних колекторах агрегатів та інерційністю процесів у гідравлічній мережі. При відпрацюванні чергового збурення один із двигунів буде збільшувати швидкість, частота іншого буде зменшуватися, що призведе до коливання напору в мережі. Для уникнення нестійких режимів при реалізації інтерактивної електромеханічної системи автоматичного керування послідовно працюючими агрегатами перевагу слід надати використанню одного датчика тиску в напірному колекторі другого агрегату.



Проведемо порівняльний аналіз схем при змішаному з'єднанні трьох агрегатів за різних комбінацій застосованого електропривода при допомозі програмного пакета *Simulink*. Порівняємо витрати електроенергії на проміжку часу 20–60 с, на якому здійснювалося інтерактивне керування.

У дослідженні використано багатоступеневі вертикальні відцентрові насосні агрегати фірми *Grundfos CR 64–2* потужністю 11 кВт [8]. Дані насосів: $Q_i = 64 \text{ м}^3/\text{год.}$; $H_i = 44 \text{ м}$; $\eta_H = 0,78$; $H_0 = 61 \text{ м}$; $\omega_i = 306,05 \text{ рад./с}$; $\dot{a}_0 = 0,00403 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$. Площі перерізу трубопроводів мережі та насоса прийнято однаковими. Статичний напір мережі складає 5 м.

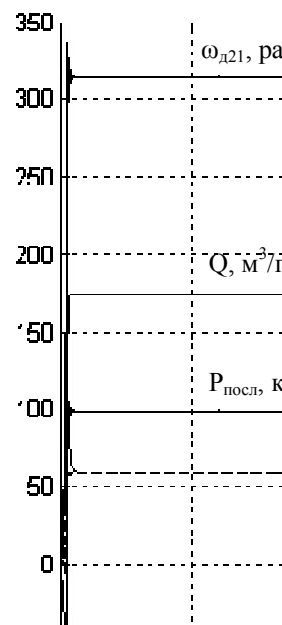
Насоси приводяться в дію приводом на основі асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором *4А132І 2О3* [9]. Дані двигунів: $E_{2i} = 11 \text{ кВт}$; $\omega_0 = 314 \text{ рад./с}$; $U_{10} = 220 \text{ В}$; $f_i = 50 \text{ Гц}$; $\eta_H = 0,88$; $\cos \varphi_H = 0,9$; $s_H = 0,03$; $x_\mu = 4,2$ відн. од.; $R_1' = 0,04$ відн. од.; $x_1' = 0,061$ відн. од.; $R_1'' = 0,025$ відн. од.; $x_2'' = 0,12$ відн. од.; $J = 0,023 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Інтерактивне керування забезпечує зменшення частоти обертання при відсутності реакції споживачів, при збільшенні опору та незначному зменшенні опору мережі. Тому опір мережі на початку дослідження обирався таким, щоб продуктивність та напір установки не були максимальними. Далі в процесі досліджень опір мережі змінювався тільки у бік зменшення.

Дослідження інтерактивної електромеханічної системи здійснювалося за опору мережі у відповідні моменти часу $\dot{a}_0 = 0,03 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$, $\dot{a}_{20,5} = \text{м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$, $\dot{a}_{40,5} = 0,023 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$ з використанням таких схем:

- з одним регульованим паралельно працюючим агрегатом та нерегульованим послідовно працюючим агрегатом із застосуванням зворотного зв'язку за продуктивністю;
- з одним регульованим паралельно працюючим агрегатом та регульованим послідовно працюючим агрегатом із застосуванням зворотних зв'язків за продуктивністю в схемах керування обох агрегатів, а також із застосуванням зворотного зв'язку за напором у схемі керування послідовним агрегатом та зворотного зв'язку за продуктивністю в схемі керування паралельним агрегатом;
- з двома регульованими паралельно працюючими агрегатами та регульованим послідовно працюючим агрегатом із застосуванням зворотних зв'язків за продуктивністю, а також із застосуванням зворотних зв'язків за продуктивністю та напором;
- з двома нерегульованими паралельно працюючими агрегатами та регульованим послідовно працюючим агрегатом із застосуванням зворотного зв'язку за продуктивністю.

Результати дослідження роботи системи з двома регульованими агрегатами представлено на рисунку 4, де: ω_{d21} – частота обертання регульованого електропривода паралельно з'єданого насоса; $P_{\text{посл}}$ – механічна потужність привідного двигуна насоса, включеного послідовно; $P_{\text{пар1}}$ – механічна потужність двигуна паралельного насоса; $H_{\text{пар1}}$ – напір паралельно з'єданого насоса.



Період квантування під час досліджень складав 10 с, коефіцієнт затухання становив 0,95. Як видно із графіків система забезпечує аперіодичні перехідні процеси за продуктивністю. Від'ємне значення продуктивності під час пуску зумовлене статичним напором мережі. Напір установки, швидкість керованого електропривода змінюються за коливальним законом із незначним перерегулюванням. Час пуску не перевищує 2 с. Тривалість перехідних процесів при зміні завдання або викликаних реакцією споживачів складає 1 с.

За 40 с спожито електричної енергії, відповідно: 0,299 кВт/год.; 0,268 кВт/год.; 0,250 кВт/год.; 0,253 кВт/год.; 0,248 кВт/год.; 0,288 кВт/год.

Висновок. У випадку регульованого електропривода всіх насосних агрегатів забезпечується найбільший рівень енергозбереження та створюються умови розширення діапазону допустимих режимів установки. Оснащення установки двома регульованими агрегатами в різних комбінаціях зменшує споживання потужності, але з різними показниками. Зворотний зв'язок за напором у схемі керування послідовного регульованого агрегату є більш прийнятним для покращення енергоефективності установки. При неможливості регулювання частоти обертання всіх насосів перевагу слід надати застосуванню одного регульованого паралельно працюючого агрегату та регульованого послідовно працюючого агрегату. Необхідно зазначити, що електромеханічна система автоматизації трьома регульованими агрегатами із застосуванням зворотного зв'язку за продуктивністю в схемі керування має нижчий рівень енергозбереження, порівняно із системою з одним регульованим паралельно працюючим агрегатом та регульованим послідовно працюючим агрегатом, де як зворотній зв'язок у схемі керування послідовним агрегатом використовується інформація про напір установки.

Таким чином, функціонування енергозберігаючого алгоритму на базі інтерактивного регулятора забезпечує коректну роботу багатоагрегатної насосної установки незалежно від комбінації застосованих електроприводів.

Список використаної літератури:

1. *Шихов А.А.* Применение частотно-регулируемого привода в энергосберегающих системах управления насосных установок / *А.А. Шихов, В.А. Андрианов* // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 7.
2. *Лезнов Б.С.* Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / *Б.С. Лезнов*. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
3. *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, 2009. – № 3 (56), p. 1. – Pp. 40–45.
4. *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, 2010. – № 3 (62), p. 2. – Pp. 37–41.
5. *Попович М.Г.* Особливості інтерактивного керування в насосних установках / *М.Г. Попович, О.І. Кіселичник, О.Ф. Соколовський* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир, 2008. – Вип. IV (47). – С. 174–179.
6. *Писемський О.В.* Оцінка ефективності інтерактивного керування в насосних установках / *О.В. Писемський, О.І. Рибачук, О.Ф. Соколовський* // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – Житомир, 2012. – Вип. II (61). – С. 39–47.
7. Група компаній ГИДРОКОМПЛЕКТ // Насосное оборудование. – 2008 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://www.seenoevilthemovil.com/help/nas_vis_zd.htm.
8. Асинхронные двигатели серии 4А : справочник / *А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин и др.* – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с.
9. Grundfos – WinCAPS версія 2010.01, CD.

СОКОЛОВСЬКИЙ Олег Феліксович – доцент кафедри спеціальних систем озброєння, 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 25.12.2012