

О.Ф. Соколовський, зав. від.
Житомирський агротехнічний коледж

ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БАГАТОАГРЕГАТНИХ НАСОСНИХ УСТАНОВКАХ

(Представлено д.т.н., проф. Поповичем М.Г.)

Проведено дослідження роботи електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками із використанням енергозберігаючого алгоритму при послідовному та паралельному вмиканні агрегатів. Розроблено систему автоматичного керування з можливістю одночасної роботи агрегатів у всьому діапазоні регулювання при послідовному з'єднанні насосів. Застосування регульованих приводів при паралельному з'єднанні покращує ефективність алгоритму.

Вступ. Забезпечення вимог технологічного процесу під час роботи насосної установки не може задовольнити вирішення питань, пов'язаних з економією електричної енергії. Необхідно розробляти шляхи енергозбереження із підтриманням якісного водопостачання споживачів. Важливим ресурсом вирішення даної проблеми є зниження енерговитрат в насосних агрегатах засобами автоматизованого електропривода.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зміна частоти обертання насоса є найбільш ефективним способом покращення енергозбереження [3]. Пристрої плавного пуску зменшують вплив ударних навантажень на електродвигун та покращують якість перехідних процесів, але не дозволяють економити електроенергію [7]. Енергозберігаючий алгоритм можливо використовувати при паралельній та послідовній роботі агрегатів [8, 9]. Алгоритм побудований на принципі: водоспоживання зростає – швидкість насоса збільшується, водоспоживання зменшується або не змінюється протягом певного проміжку часу – швидкість насоса уповільнюється [5]. Застосування зворотного зв'язку за частотою обертання регульованого електропривода та відмова від зворотного зв'язку двигуна нерегульованого насоса спрощує реалізацію при збереженні ефективності алгоритму [9]. Замість розсіювання кінетичної енергії руху води її можна використовувати для привода гідротурбін, до яких приєднуються електрогенератори [4].

Постановка завдання. В процесі регулювання виникають ситуації, коли двигун нерегульованого насоса необхідно від'єднати від мережі живлення [9]. При цьому забезпечення потреб споживачів здійснюється регульованим агрегатом. У випадку, коли регульований агрегат не може задовольнити потреби споживачів, нерегульований агрегат знову вмикається. Ці процеси супроводжуються виникненням гідравлічних ударів в системі та перевантаженням двигуна нерегульованого насоса. **Метою** даної роботи є розробка електромеханічної системи автоматичного керування при послідовній роботі агрегатів з відмовою від комутації в силовому колі нерегульованого електропривода та дослідження ефективності енергозберігаючого алгоритму при паралельному з'єднанні регульованих насосів.

Послідовна робота агрегатів. Величина частоти обертання двигуна регульованого насоса на кожному такті квантування при застосуванні енергозберігаючого алгоритму із зворотним зв'язком за напором [9]:

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

де T_0 – період квантування; H – напір насосної установки; k – коефіцієнт затухання; c – мала стала для уникнення ділення на нуль; n – ціле додатне число.

Швидкість регульованого електропривода з врахуванням зворотного зв'язку за продуктивністю насосної установки на кожному такті квантування [5]:

$$\omega_{\partial 1}((n+1)T_0) = \frac{kQ(nT_0)}{Q((n-1)T_0) + c} \omega_{\partial 1}((n-1)T_0), \quad (2)$$

де Q – продуктивність насосної установки.

Під час роботи послідовно включених агрегатів при досягненні мінімального напору регульованого агрегату – нерегульований насос вимикається [9]. Якщо один насос не

забезпечуватиме необхідного напору – нерегульований агрегат отримає сигнал на вмикання. Аналіз залежностей (1, 2) показує, що робота алгоритму при зниженні напору до нуля не порушиться при переході насоса в турбінний режим. Для реалізації даного режиму необхідне застосування перетворювача частоти з можливістю рекуперації енергії.

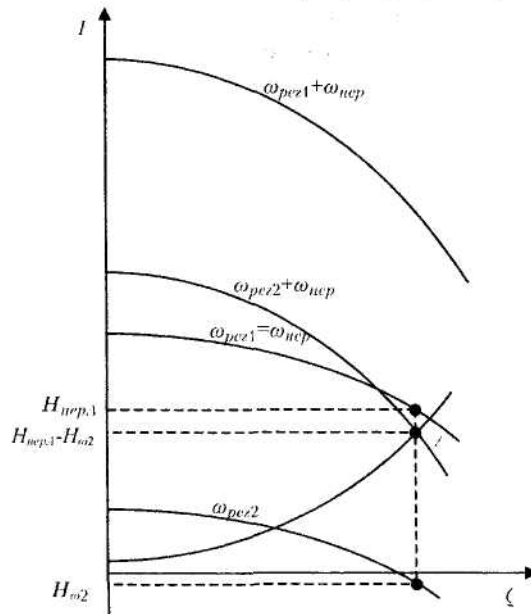


Рис. 1. Напірні характеристики при послідовній роботі насосних агрегатів

На рис. 1 представлені напірні характеристики насосів та характеристика опору мережі. Нерегульований насос обертається з частотою ω_{nep} , швидкість регульованого насоса ω_{prc} визначається вихідними параметрами перетворювача частоти. Насоси мають однакові напірні характеристики при номінальній частоті обертання $\omega_{prc1} = \omega_{nep}$. Характеристики $\omega_{prc1} + \omega_{nep}$, $\omega_{prc2} + \omega_{nep}$ отримані при графічному додаванні напорів насосних агрегатів за відповідної продуктивності. В точці A регульований насос обертається з частотою $\omega_{prc} = \omega_{prc2}$. При цьому установка створює напір $H_{nepA} - H_{\omega 2}$, регульований електропривод працює в генераторному режимі. Структурна схема ЕМСАК послідовно працюючих агрегатів подана на рис. 2.

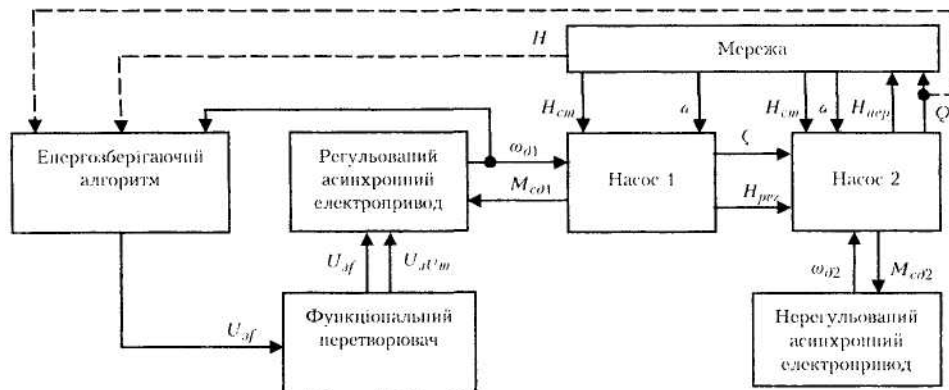


Рис. 2. Структурна схема інтерактивної ЕМСАК при послідовній роботі насосних агрегатів

Енергозберігаючий алгоритм встановлює мінімально достатню частоту обертання регульованого насоса, що задовольняє потреби споживачів [8].

Функціональний перетворювач формує завдання амплітуди напруги $U_{z1/m}$ на основі сигналу U_{zf} енергозберігаючого алгоритму [5]. Математична модель регульованого асинхронного

електропривода створена на основі перетворювача частоти та двофазової моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Перетворювач частоти побудований на рівняннях симетричної системи напруг та перетворення 3–2. Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором – двофазова модель в системі координат $a-b$ [6]. Математична модель некерованого асинхронного електропривода розроблена на основі математичної моделі перетворювача напруги та двофазової моделі асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Математичну модель насосної установки описує система рівнянь:

$$H_{0\text{рег}} + H_{0\text{нер}} = \frac{m}{\rho g S^2} \dot{Q} + a_{\text{ф.рег}} Q^2 + a_{\text{ф.нер}} Q^2 + a Q^2 + H_{\text{ст}}; \tag{3}$$

$$H_{\text{рег}} = H_{0\text{рег}} - a_{\text{ф.рег}} Q^2; \tag{4}$$

$$H_{\text{нер}} = H_{0\text{нер}} - a_{\text{ф.нер}} Q^2; \tag{5}$$

$$H = H_{\text{рег}} + H_{\text{нер}}; \tag{6}$$

$$H_{0\text{рег}} = k_u \omega_{\text{рег}}^2; \tag{7}$$

$$H_{0\text{нер}} = k_u \omega_{\text{нер}}^2; \tag{8}$$

$$M_{\text{с.рег}} = \frac{QH_{\text{рег}}\rho g}{\eta_{\text{рег}}\omega_{\text{рег}}}; \tag{9}$$

$$M_{\text{с.нер}} = \frac{QH_{\text{нер}}\rho g}{\eta_{\text{нер}}\omega_{\text{нер}}}, \tag{10}$$

де $H_{\text{рег}}$ – напір регульованого насоса; $H_{\text{нер}}$ – напір нерегульованого насоса; $H_{\text{ст}}$ – статичний напір; $H_{0\text{рег}}$ – фіктивний напір регульованого насоса; $H_{0\text{нер}}$ – фіктивний напір нерегульованого насоса; a – гідравлічний опір мережі; $a_{\text{ф.рег}}$ – фіктивний гідравлічний опір регульованого насоса; $a_{\text{ф.нер}}$ – фіктивний гідравлічний опір нерегульованого насоса; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; $\eta_{\text{рег}}$ – ККД регульованого насоса; $\eta_{\text{нер}}$ – ККД нерегульованого насоса; m – маса води в трубопроводі мережі та насосах; S – площа поперечного перерізу трубопроводів; $M_{\text{с.рег}}$ – момент опору на валі регульованого насоса; $M_{\text{с.нер}}$ – момент опору на валі нерегульованого насоса; k_u – коефіцієнт пропорційності.

Під час дослідження використано два багатоступеневі вертикальні відцентрові насоси CV 125-30 [1] та два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором 4A250M2Y3 [2].

Дані кожного насоса: $Q_n = 125 \text{ м}^3/\text{год}$; $H_n = 175 \text{ м}$, $\eta_n = 76 \%$; $H_{0n} = 212 \text{ м}$; $\omega_n = 216 \text{ рад./с}$; $a_{\text{ф}} = 0,002 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год.}^2)$.

Дані кожного двигуна: $P_{2n} = 90 \text{ кВт}$; $n_0 = 3000 \text{ об./хв.}$; $U_{1\text{ф}} = 220 \text{ В}$; $f_u = 50 \text{ Гц}$; $\eta_n = 0,92$; $\cos\varphi_n = 0,9$; $x_\mu = 5,2 \text{ відн. од.}$; $R_1' = 0,02 \text{ відн. од.}$; $x_1' = 0,078 \text{ відн. од.}$; $R_2' = 0,016 \text{ відн. од.}$; $x_2' = 0,13 \text{ відн. од.}$; $J = 0,52 \text{ кгм}^2$.

Параметри перетворювача частоти і функціонального перетворювача: $k_f = 5 \text{ Гц/В}$; $k_{U_m} = 31 \text{ В/В}$; $T_{\mu 1} = T_{\mu 2} = 0,01 \text{ с}$; $U_{3U_m} = 6,67 \text{ В}$; $U_0 = 31 \text{ В}$; $k_{\text{фII}} = 0,135 \text{ 1/В}$.

Параметри енергозберігаючого алгоритму: $U_{3fn} = 10 \text{ В}$; $T_0 = 10 \text{ с}$; $T_{\text{ф}} = 0,1 \text{ с}$; $c = 10^{-8}$.

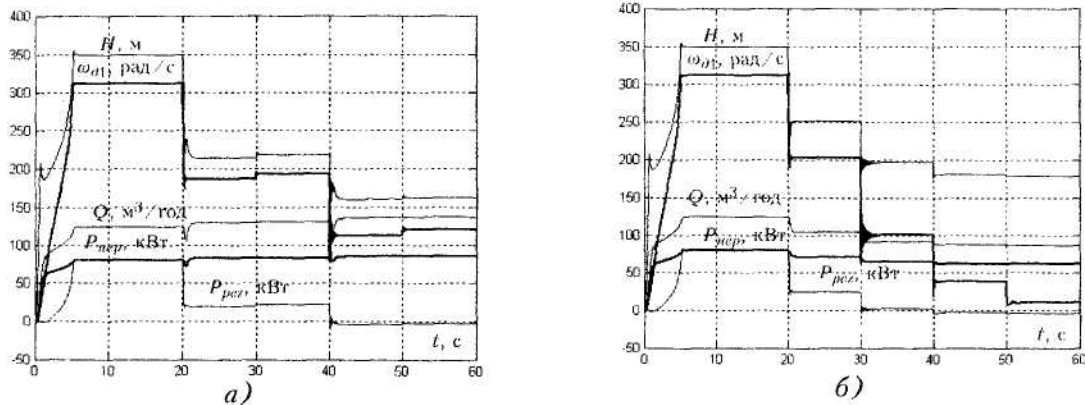


Рис. 3. Графіки перехідних процесів установки при послідовній роботі насосів

На рис. 3, *a* відображені графіки перехідних процесів при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю насосної установки. Значення коефіцієнта затухання прийнято 0,6.

При пуску системи гідравлічний опір складає $0,02112 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$. У момент часу 20 с енергозберігаючий алгоритм зменшує швидкість регульованого насоса. Через 0,5 с споживачі знижують опір на величину $0,0095 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$ для збільшення продуктивності. Тому на момент часу 30 с швидкість регульованого насоса зростає. Аналогічно система працює після того, як споживачі зменшили опір мережі на $0,004 \text{ м}/(\text{м}^6/\text{год}^2)$. У зв'язку із зменшенням напору регульованого насоса нижче нуля на проміжку часу 40 с–60 с його привод переходить у режим рекуперації енергії.

На рис. 3, *б* подано графіки при застосуванні зворотного зв'язку за напором насосної установки. Розглянуто випадок, коли споживачі не реагують на зміну швидкості насоса. При цьому прийнято $k = 0,65$.

Під час досліджень спожито:

- 2,18 кВт·год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю;
- 1,9 кВт·год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за напором насосної установки.

Для порівняння проведено дослідження ЕМСАК насосною установкою з двома регульованими агрегатами. Величина напору установки відповідала початковому значенню, встановленому в схемі з комутацією нерегульованого електропривода. Продуктивність на відповідних інтервалах часу дорівнювала продуктивності системи із вмиканням нерегульованого електропривода.

При цьому використано електроенергії 2,18 кВт·год із зворотним зв'язком за продуктивністю, 1,7 кВт·год із зворотним зв'язком за напором. Застосування роботи регульованого електропривода в генераторному режимі не зменшило рівень енергозбереження установки.

Паралельна робота агрегатів. Під час паралельної роботи регульованого та нерегульованого насосних агрегатів із застосуванням енергозберігаючого алгоритму зміна продуктивності установки відбувається за рахунок регульованого насоса [9]. При цьому обмежується область допустимих режимів роботи установки (рис. 4).

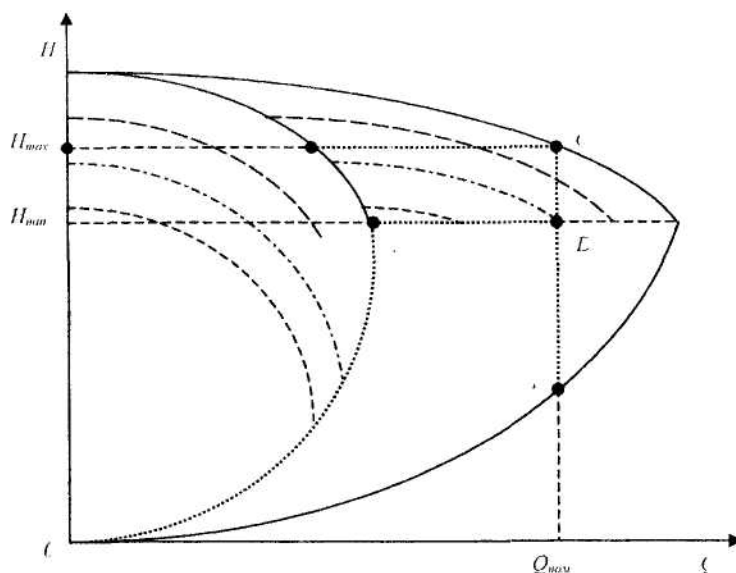


Рис. 4. Напірні характеристики при паралельній роботі насосних агрегатів

Максимально допустимий напір двох агрегатів H_{\max} та номінальна продуктивність $Q_{\text{ном}}$ визначаються необхідним значенням напору для даної мережі.

Під час роботи одного агрегату мінімально допустимий напір знаходиться в межах квадратичної параболи, що проходить через точки із максимально допустимою продуктивністю при заданих частотах обертання. На рис. 4 область допустимих режимів одного агрегату позначена точками $OABFO$.

Мінімально допустимий напір двох агрегатів H_{\min} (регульованого і нерегульованого) визначається точкою F , коли нерегульований агрегат працює з максимальною продуктивністю, регульований – з нульовою продуктивністю. При роботі регульованого і нерегульованого агрегатів діапазон роботи обмежений лініями BC , CD , DF , FB .

Мінімально допустимий напір двох регульованих агрегатів відмічений параболою, яка проходить через точки із максимально допустимою продуктивністю двох агрегатів при заданих частотах обертання. Робочий діапазон двох регульованих насосів позначений точками $OABCDK0$.

Розглянемо роботу установки з двома регульованими агрегатами. Структурна схема ЕМСАК паралельно працюючих агрегатів подана на рис. 5.

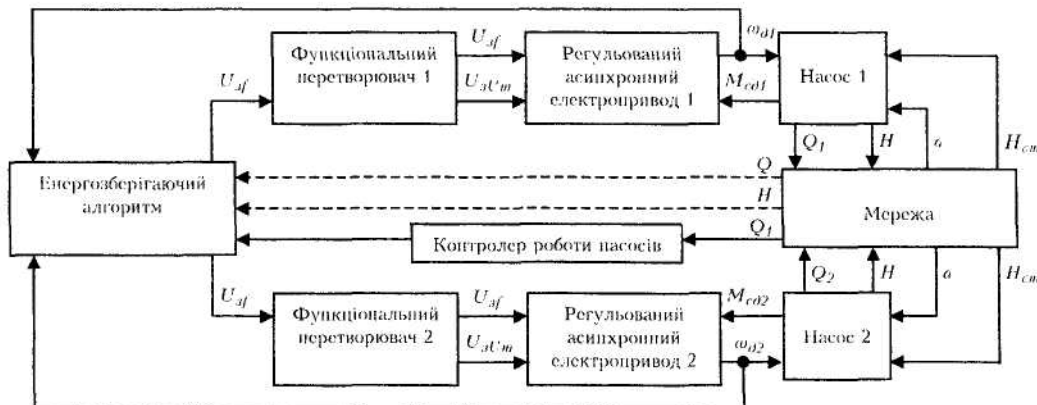


Рис. 5. Структурна схема інтерактивної ЕМСАК при паралельній роботі насосних агрегатів

Контролер роботи насосів вмикає агрегат 2 при досягненні насосом 1 максимальної продуктивності та вмикає агрегат 2, якщо продуктивність двох насосів досягне мінімального значення.

Математична модель установки:

$$H_1 = H_2 = \frac{m}{\rho g S_m^2} \dot{Q} + aQ^2 + H_{cm}; \tag{11}$$

$$H_1 = H_{01} - \frac{m_1}{\rho g S_1^2} \dot{Q}_1 - a_{\phi 1} Q_1^2; \tag{12}$$

$$H_2 = H_{02} - \frac{m_2}{\rho g S_2^2} \dot{Q}_2 - a_{\phi 2} Q_2^2; \tag{13}$$

$$Q = Q_1 + Q_2; \tag{14}$$

$$M_{c1} = \frac{Q_1 H_1 \rho g}{\eta_1 \omega_1}; \tag{15}$$

$$M_{c2} = \frac{Q_2 H_2 \rho g}{\eta_2 \omega_2}; \tag{16}$$

$$H_{01} = k_n \omega_1^2; \tag{17}$$

$$H_{02} = k_n \omega_2^2, \tag{18}$$

де H_1 – напір насоса 1; H_2 – напір насоса 2; H_{cm} – статичний напір; H_{01} – фіктивний напір насоса 1; H_{02} – фіктивний напір насоса 2; Q_1 – продуктивність насоса 1; Q_2 – продуктивність насоса 2; $a_{\phi 1}$ – фіктивний гідравлічний опір насоса 1; $a_{\phi 2}$ – фіктивний гідравлічний опір насоса 2; η_1 – ККД насоса 1; η_2 – ККД насоса 2; m – маса води в трубопроводі мережі; m_1 – маса води в насосі 1; m_2 – маса води в насосі 2; S_m – площа поперечного перерізу трубопроводу мережі; S_1 – площа перерізу трубопроводу насоса 1; S_2 – площа перерізу трубопроводу насоса 2; M_{c1} – момент опору на валі насоса 1; M_{c2} – момент опору на валі насоса 2; ω_1 – частота обертання насоса 1; ω_2 – частота обертання насоса 2.

На рис. 6 побудовані графіки перехідних процесів, що відображають роботу системи при зміні швидкості двох агрегатів та відповідної реакції споживачів із використанням зворотних зв'язків за продуктивністю (рис. 6, а) та напором (рис. 6, б) насосної установки. Для дослідження використано два багатоступеневі вертикальні відцентрові насоси CV 125-30 та два асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором 4А250М2УЗ. Параметри перетворювача частоти, функціонального перетворювача, енергозберігаючого алгоритму відповідають структурній схемі при послідовній роботі агрегатів. При застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю коефіцієнт затухання становив 0,9. При зворотному зв'язку за напором $k = 0,98$.

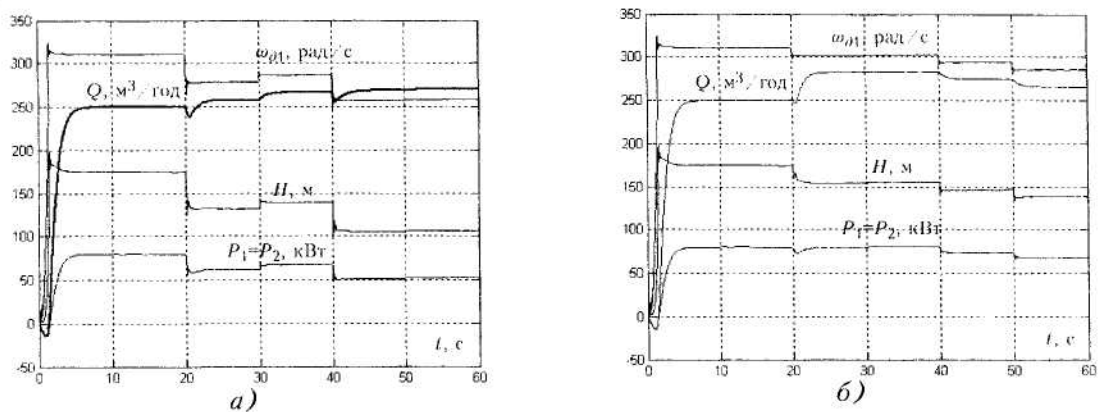


Рис. 6. Графіки перехідних процесів установки при паралельній роботі насосів

На проміжку часу 60 с було використано:

– 2,38 кВт·год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за продуктивністю;

– 2,82 кВт·год електроенергії при застосуванні зворотного зв'язку за напором насосної установки.

При роботі системи з одним регульованим приводом з початковим напором та продуктивністю на відповідних інтервалах часу, що відповідають попередній схемі, спожито на 0,31 кВт·год більше із застосуванням зворотного зв'язку за продуктивністю та на 0,14 кВт·год більше при застосуванні зворотного зв'язку за напором. Впровадження регульованого привода всіх насосних агрегатів забезпечило економію 11,5 % та 4,7 % відповідно.

Висновок. Переведення регульованого агрегату в турбінний режим позбавляє необхідності вмикань та вимикань перегульованого насоса та забезпечує збереження ефективності алгоритму при послідовному з'єднанні агрегатів. Необхідно враховувати обмеження максимальної потужності регульованого електропривода в генераторному режимі. Система автоматичного керування з двома регульованими паралельно працюючими агрегатами забезпечує великий діапазон допустимих режимів роботи установки, покращує ефективність енергозберігаючого алгоритму.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Grundfos – WinCAPS версія 7.41, CD.
2. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Соболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.
3. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуховых установках. – М.: Энергоатомиздат, 2006.
4. Перекрест А.Л., Коренькова Т.В. Характеристики турбомеханизмов в двигательном и тормозном режимах электропривода // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". – Київ: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 180–183.
5. Попович М.Г., Печеник М.В., Кіселичник О.І., Соколовський О.Ф. Енергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками // Електромашинобудування та електрообладнання / Одеський

- національний політехнічний університет: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – Київ: Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 311–314.
6. Попович М.Г., Кіселичник О.І. Електромеханічні системи автоматичного керування робочими параметрами турбомеханізмів на основі принципу пасивності // Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика // Вісник НТУ "ХП". – 2004. – Вип. 43. – С. 16–19.
 7. Родин Я.Н., Сидорин А.Е. Каскадно-частотное управление асинхронными двигателями на насосных станциях // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2006. – № 2.
 8. Соколовський О.Ф. Інтерактивна електромеханічна система автоматичного керування паралельно працюючими насосними агрегатами // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2007. – Вип. 42. – С. 133–140.
 9. Соколовський О.Ф. Застосування інтерактивного алгоритму в схемах багатоагрегатних насосних установок // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2007. – Вип. 43. – С. 47–54.

СОКОЛОВСЬКИЙ Олег Феліксович – завідувач відділення "Електрифікація та автоматизація сільського господарства" Житомирського агротехнічного коледжу.

Наукові інтереси:

- енергозбереження в системах автоматизованого електропривода;
 - дослідження електромеханічних систем автоматичного керування насосними установками.
- 8-0412-259549, 8-097-578-77-54, of@ukr.net

Подано 25.03.2008