

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИМИ НАСОСАМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВАРІАЦІЯХ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕРЕЖІ

Вступ. Насосні установки, що широко використовуються у промисловості, сільському та комунальному господарствах, є потужними споживачами електричної енергії. Для некерованих систем, завданням яких є перекачування рідини в великих об'ємах, втрати енергії досягають 40% у порівнянні з частотно-керованими електроприводами [1]. Основним недоліком таких систем є невизначеність коефіцієнта корисної дії (ККД) насосу під час роботи. Звичайно, насосні установки проєктуються на роботу при максимальному ККД, але під час їх роботи можуть змінюватися параметри гідравлічної мережі, що зміщують робочу точку з номінального положення. Якщо у системі більш ніж один насос, зміна технологічних параметрів одного насосу також впливає на роботу іншого. Таким чином ККД обох насосів може значно відхилитися від максимального значення. У роботах [2], [3] запропонована енергоефективна система автоматичного керування для послідовного, а у [4], [5] для паралельного з'єднання насосів, що на основі вимірювання продуктивності та частоти обертання привідного асинхронного двигуна підвищує ККД одного з насосів до максимального значення при варіаціях гідравлічного опору мережі. Але у деяких технологічних процесах можлива зміна не тільки гідравлічного опору, а також і геодезичного напору, що викликає додаткове зміщення робочої точки. Підвищення ККД насосу у таких системах є актуальною і важливою задачею.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення енергоефективності системи керування двома послідовно з'єднаними насосами водопостачання при варіаціях параметрів гідравлічної мережі.

Матеріали досліджень. Математична модель двох послідовно з'єднаних насосів разом із гідравлічною мережею [3] описується наступною системою рівнянь

$$dQ/dt = H_{01н} \omega_1^2 / \chi \omega_{н1}^2 + H_{02н} \omega_2^2 / \chi \omega_{н2}^2 - H_{ст}(t) / \chi - (a_{н1} + a_{н2} + a(t)) Q^2 / \chi, \quad (1)$$

$$H_1 = H_{01н} \omega_1^2 / \omega_{н1}^2 - a_{н1} Q^2, \quad (2)$$

$$H_2 = H_{02н} \omega_2^2 / \omega_{н2}^2 - a_{н2} Q^2, \quad (3)$$

$$M_{c1} = \rho g Q H_1 / \eta_{кн} \omega_1, \quad (4)$$

$$M_{c2} = \rho g Q H_2 / \eta_{кн} \omega_2, \quad (5)$$

$$H = H_1 + H_2, \quad (6)$$

де Q – продуктивність насосів; $a_{н1}$, $a_{н2}$ – номінальні гідравлічні опори керованого та некерованого насосів відповідно; $a(t)$ – гідравлічний опір мережі; H_1 , H_2 – напори керованого та некерованого насосів; $H_{01н}$ та $H_{02н}$ – номінальні напори при нульових подачах керованого та некерованого насосів при номінальних швидкостях; ω_1 , ω_2 – кутові швидкості обертання керованого та некерованого насосів; $\omega_{н1}$, $\omega_{н2}$ – номінальні кутові швидкості обертання керованого та некерованого насосів; χ – стала інтегрування; M_{c1} , M_{c2} – моменти навантаження на валах двигунів керованого та некерованого насосів; $\eta_{кн}$, $\eta_{кнн}$ – ККД керованого та некерованого насосів; H – сумарний напір першого та другого насосу; $H_{ст}(t)$ – геодезична висота підйому води; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; t – час.

Параметри $a(t)$ та $H_{ст}(t)$ є функціями від часу та змінюються під час роботи системи керування.

ККД насосів є нелінійними функціями, що залежать від положень робочих точок на напірних характеристиках $\eta_i = f(Q_i, H_i)$. Так як математично описати ці залежності досить складно, їх апроксимовано двошаровими нейронними мережами типу прямого поширення з 10, 1 нейронами та функціями активації гіперболічного тангенсу та лінійною у відповідних шарах [6]. Вхідні та вихідні масиви для тренування нейронної мережі були взяті з каталожних характеристик виробника насосів [7].

Приводні асинхронні двигуни насосів описуються нелінійними двофазними моделями в нерухомій системі координат статора a-b [8]. Перетворювач частоти реалізує квадратичний закон керування $u/f^2 = \text{const}$.

Регулятор коефіцієнта корисної дії керованого насосу, робота якого представлена у [2], складається із звичайного ПІ-регулятора, що реалізує умову $\omega - \omega^* = 0$, за якої відбудеться вихід робочої точки на лінію максимального ККД, та блоку обчислення заданої швидкості ω^* . Математичний опис регулятора має наступний вигляд

$$\Delta f = (\omega - \omega^*) (K_p + 1/T_i p), \quad (7)$$

$$\omega^* = k_1 Q^2 + k_2 Q + k_3, \quad (8)$$

де Δf – приріст частоти завдання; K_p – пропорційна складова регулятора; T_i – стала часу інтегральної частини регулятора; k_1 , k_2 , k_3 – коефіцієнти апроксимації кривої максимального ККД керованого за швидкістю

насосу.

Для дослідження вибрано два насоси Vogel Pumpen CNX-100-65-400 з наступними максимальними даними: потужність 156.1 кВт, напір 240 м, продуктивність 164.9 м³/год, ККД 62.9%, частота обертання 2900 об/хв. Номінальні дані привідних асинхронних двигунів наступні: потужність 160 кВт, синхронна частота обертання 3000 об/хв, ККД 96%, лінійна напруга 380 В, коефіцієнт потужності 0.9, ковзання 0.019, активний опір статора 0.0117 Ом, індуктивність статора 0.0126 Гн, активний опір ротора 0.0094 Ом, індуктивність ротора 0.0127 Гн, взаємна індуктивність статора та ротора 0.0124 Гн. При моделюванні прийнято $H_{ст}=150$ м, $\chi=0.5$ с/(м²/год), приведений момент інерції на валах двигунів $J=1.4$ кг м². Розрахункові параметри насосів на основі напірних характеристик є наступними: $H_{01н}=H_{02н}=235$ м, $a_{н1}=a_{н2}=9018$ 1/(м⁵/с²).

Результати математичного моделювання системи автоматичного керування представлені на рис. 1.

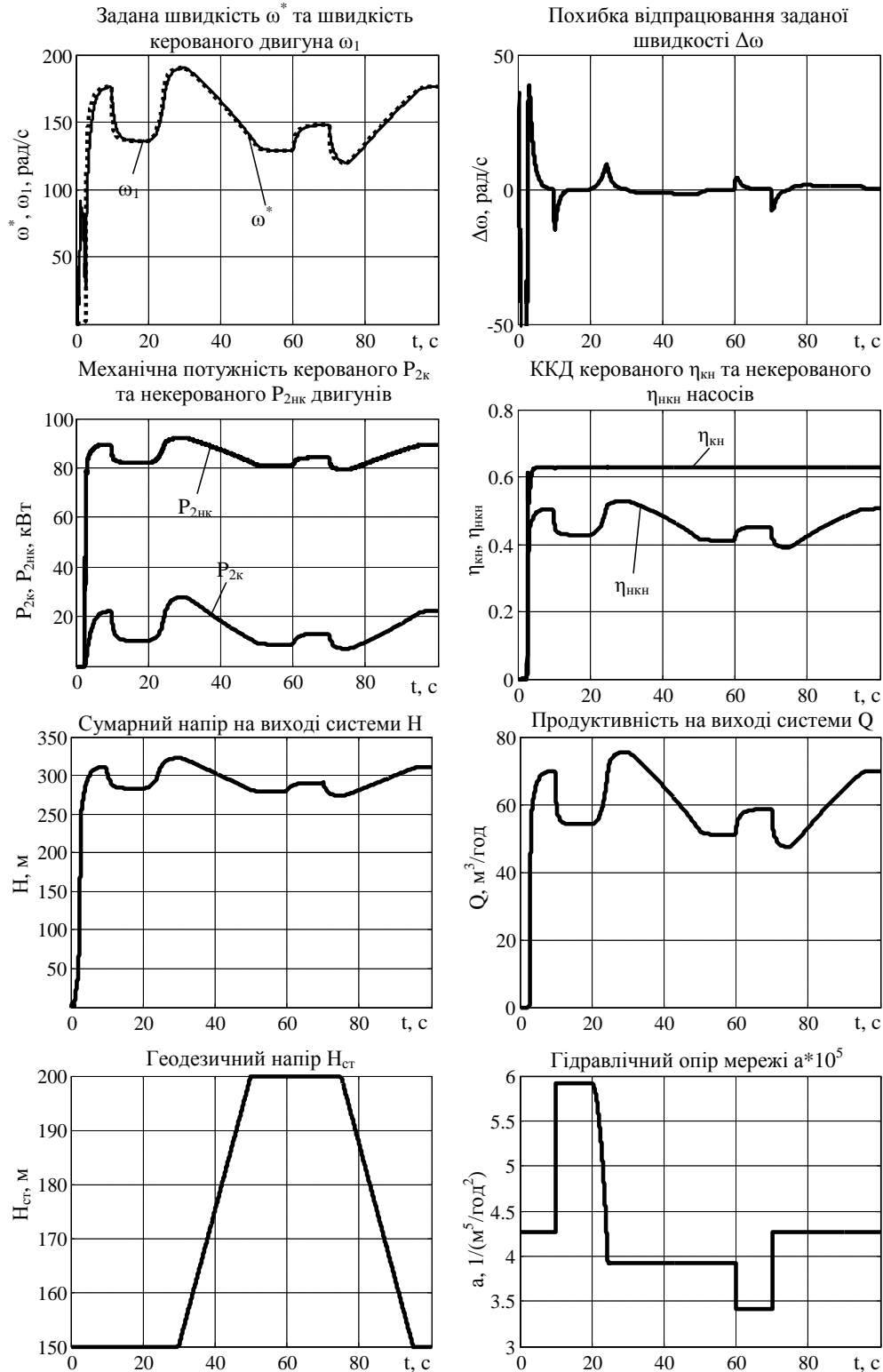


Рис. 1 Графіки перехідних процесів у системі керування

Як видно з рис. 1, після пуску системи ККД керованого насосу підвищується до максимально можливого значення, що складає 0.629. ККД некерованого насосу залежить від початкового розташування робочої точки і може як зменшуватися так і збільшуватися. На 10 секунд відбувається стрибкоподібне збільшення гідравлічного опору мережі. Робоча точка зміщується, ККД знову підвищується до максимального значення. У 15 секунд гідравлічний опір мережі плавно зменшується впродовж 15 секунд. Після завершення зміни гідравлічного опору ККД керованого насосу знову максимізується. У 30 секунд відбувається збільшення геодезичного напору в системі за лінійним законом від 150 до 200 м тривалістю 20 секунд. Під час зміни цього параметру виникає статична похибка у межах 1,2-1,8 рад/с. Після усталення геодезичного напору на величині 200 м статична похибка знову прямує до нуля. Далі в 60 і 70 секунд знову відбувається стрибкоподібне зменшення та збільшення гідравлічного опору відповідно. Регулятор працює аналогічно. Похибка відпрацювання заданої швидкості коливається в околі нуля. Аналогічно у 75 секунд геодезичний напір зменшується за 20 секунд від 200 до 150 м. Після усталення цього параметру статична похибка за швидкістю знову приймає нульове значення.

Механічна потужність на валу керованого двигуна зменшується у порівнянні з некерованим на 70 кВт (43% від номінальної потужності) при першій зміні гідравлічного опору, на 60 кВт (37% від номінальної потужності) при другій зміні, 50 кВт (31% від номінальної потужності) при третій зміні і на 65 кВт (40% від номінальної потужності) при четвертій зміні гідравлічного опору. При зміні геодезичного напору мережі різниця потужностей складає 60-70 кВт.

Зміна гідравлічного опору охоплює 50% від його номінального значення в сторони збільшення та зменшення, що моделює реальні гідравлічні системи. Геодезичний напір змінюється у межах 20% від максимального напору у системі. Таким чином зменшення механічної потужності на валу керованого двигуна при варіаціях гідравлічного опору та геодезичного напору можлива від 30 до 40% від номінальної потужності. ККД керованого двигуна при цьому максимальний, а ККД некерованого залежить від поточного розташування робочої точки.

Висновки. Запропонована електромеханічна система автоматичного керування двома послідовно з'єднаними насосами водопостачання, один з яких керований за швидкістю, забезпечує підвищення коефіцієнта корисної дії керованого насосу до максимально можливого значення. При зміні гідравлічного опору мережі у межах 50% від його номінального значення та геодезичного напору в межах 20% від максимального значення напору у системі, регулятор забезпечує підвищення до максимуму ККД керованого насосу. Проведене математичне моделювання показало, що зменшення потужності на валу керованого двигуна можливе від 31% до 43% від номінальної потужності. Запропоновану систему керування доцільно впроваджувати у системах перекачування рідин, гідроакумуючих електростанціях, системах поливу та зрошення, системах наповнення резервуарів тощо.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шевчук С.П. Насосні, вентиляторні та пневматичні установки : підручник для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямком підготовки «Електромеханіка» / С.П. Шевчук, О.М. Попович, В.М. Світлицький ; Мін-во освіти і науки України ; НТУУ «КПІ». – Київ : НТУУ «КПІ», 2010. – 308 с.
2. Бур'ян С.О. Підвищення енергоефективності електромеханічної системи автоматичного керування послідовно з'єднаними насосами водопостачання / С.О. Бур'ян // Наукові праці Донецького національного техн. університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: ДНТУ, 2013. - №1(14)'2013. – С. 47-52.
3. 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. – N3/2010 (62). – [part 2]. – PP.37-41.
4. Бур'ян С.О. Двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування паралельно з'єднаними насосами водопостачання // Інформаційний збірник Промелектро. «Промислова електроніка та електротехніка». Випуск №4-5 2011 р. с. 10-16.
5. Бур'ян С.О., Гришук Т.В. Екстремальна електромеханічна система керування паралельно з'єднаними насосами водопостачання // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – №2. – С. 153-162.
6. Бур'ян С.О. Оцінювач коефіцієнта корисної дії насосу на основі нейронної мережі та каталожних характеристик / С.О. Бур'ян, Т.В. Гришук // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць ІХ Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07-08 квітня 2011 р. – Кременчук, КНУ, 2011. – с. 97-98.
7. ITT Industries. Vogel Select CD// Selection Program. – Jan. – 2009.
8. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Springer – Verlag, Berlin: 1996. – 420 p.