

УДК 62-83: 628.12

**С.О. БУР'ЯН**  
**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут»**  
**sburyan@rambler.ru**

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПОСЛІДОВНО З'ЄДНАНИМИ НАСОСАМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

*У статті розглянуто питання підвищення енергоефективності системи керування двома послідовно з'єднаними насосами водопостачання. Один із насосів комплектується частотно-керованим асинхронним електроприводом. Приведена математична модель енергоефективної системи керування та проведено її дослідження методом математичного моделювання.*

**Ключові слова:** насос, асинхронний електропривод, енергоефективність, коефіцієнт корисної дії, водопостачання, послідовне з'єднання насосів, продуктивність, напір, нейронна мережа, оцінювач, математичне моделювання, ПІ-регулятор.

**Постановка проблеми.** Насосні установки, які забезпечують країну водою, є потужними споживачами електричної енергії. Сучасні вимоги їх експлуатації потребують впровадження нових енергозберігаючих технологій. Застосування регульованого електроприводу суттєво підвищує енергоефективність систем водопостачання, знижуючи втрати електричної енергії до 30-40%. Тому актуальним питанням є впровадження високоефективних електромеханічних систем автоматичного керування на базі регульованих електроприводів, що дозволить забезпечити додаткове підвищення енергоефективності насосної установки.

Вибір насосного обладнання та режимів його роботи виконується, виходячи з особливостей технологічної задачі. В процесі роботи насосної установки робоча точка може відхилятися від точки з максимальним коефіцієнтом корисної дії, знижуючи енергоефективність насосу. Так як номінальний ККД насосу зазвичай нижчий за ККД двигуна, то його зменшення суттєво знижує енергоефективність системи в цілому. Багатоагрегатні насосні установки, що використовуються в системах перекачування великих об'ємів рідини, поливу, системах наповнювання резервуарів, гідроакмулюючих електростанціях тощо, працюють на робочих точках, які можна вважати квазістаціонарними через повільність зміни гідравлічного опору. Постає питання передачі великої кількості води без обмеження за часом з максимальною енергоефективністю.

**Аналіз попередніх досліджень.** Підвищення енергоефективності систем водопостачання є одним з основних пріоритетів для сучасної науки. Широко розповсюджені системи стабілізації напору та продуктивності на основі частотно-керованих асинхронних електроприводів забезпечують до 40% економії електроенергії [1] у порівнянні із регулюванням за допомогою засувки [2]. Кібернетичні системи забезпечують підвищення енергоефективності за допомогою впровадження ігрових ситуацій між споживачем та системою керування і дозволяють знаходити оптимальне співвідношення між їх потребами [3], [4]. Також перспективним є впровадження бездавачевого керування насосними установками на основі нейронних мереж та фаззи-логіки [5], [6]. Багато провідних корпорацій, що займаються розробкою та продажем насосних установок, впровадили «інтелектуальні» насоси, які автоматично знаходять робочу точку за принципом мінімуму енергоспоживання при забезпеченні необхідного технологічного процесу. Системи перекачування великої кількості рідини без обмеження за часом використовують стабілізацію тиску, рівня в резервуарах, або зовсім некеровані. Для таких систем запропонований екстремальний енергоефективний закон керування [7], що на основі частотно-керованого асинхронного електропривода зменшує покроково частоту обертання привідного двигуна, доки робоча точка не опиниться в околі максимального ККД насосу.

**Мета роботи.** Метою роботи є підвищення енергоефективності електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою за рахунок впровадження енергоефективного регулятора коефіцієнта корисної дії насосу та застосування частотно-регульованого електроприводу при послідовному з'єднанні двох насосів.

**Матеріали досліджень.** Насосна установка, що складається з двох послідовно з'єднаних насосів, один з яких укомплектовано частотно-керованим асинхронним електроприводом, працює на робочій точці А з напірною характеристикою 1 згідно рис. 1, причому для керованого насосу робочою буде точка А<sub>1</sub> та напірна характеристика 2, а для некерованого – А<sub>2</sub> та напірна характеристика 3. Загальна характеристика гідравлічної мережі позначена 4, а характеристика гідравлічної мережі для керованого насосу позначена як 5. Характеристика, що складається з точок максимального ККД для керованого насосу позначена як  $\eta_{\max}$ .

Для того, щоб керований за швидкістю насос працював з максимальною енергоефективністю, необхідно, щоб його робоча точка потрапила на лінію максимального ККД.

Враховуючи відомі способи керування технологічними параметрами насосу, це можна зробити наступними чином: змінювати гідравлічний опір мережі або змінювати швидкість обертання привідного асинхронного двигуна. Перший спосіб є неефективним, так як потребує додаткового приводу регулювання засувками та забезпечує великі втрати у насосі та гідромережі. Застосування керованого електроприводу додатково забезпечує економію електричної енергії за рахунок зменшення частоти обертання.

Система керування повинна змінювати швидкість обертання керованого асинхронного електродвигуна  $\omega_1$  так, щоб робоча точка насосу опинилася на  $B_1$  зі швидкістю обертання  $\omega^*$ . При цьому загальна робоча точка системи буде  $B$ , а некерованого насосу  $B_2$ .

При зміні гідравлічного опору мережі у системі робоча точка буде відхилятися від лінії максимального ККД, що спричинить зміну швидкості  $\omega^*$  і переналаштування системи керування на нову робочу точку з максимальним ККД.

У будь-якому випадку на вихідну частоту перетворювача повинні накладатися обмеження верхнього рівня, наприклад 50 Гц. Нижній рівень обмеження характеризується виключно технологічним процесом і задається користувачем.

Математична модель двох послідовно з'єднаних насосів разом із гідравлічною мережею [7] описується наступною системою рівнянь

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

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

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

$$M_{c1} = \rho g Q H_1 / \hat{\eta}_{кн1} \omega_1,$$

$$M_{c2} = \rho g Q H_2 / \hat{\eta}_{кн2} \omega_2,$$

$$H = H_1 + H_2,$$

де  $Q$  – продуктивність насосів;  $a_{н1}$ ,  $a_{н2}$  – номінальні гідравлічні опори керованого та некерованого насосів відповідно;  $a$  – гідравлічний опір мережі;  $H_1$ ,  $H_2$  – напори керованого та некерованого насосів відповідно;  $H_{01н}$  та  $H_{02н}$  – номінальні напори при нульових подачах керованого та некерованого насосів при номінальних швидкостях відповідно;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  – кутові швидкості обертання керованого та некерованого насосів відповідно;  $\omega_{н1}$ ,  $\omega_{н2}$  – номінальні кутові швидкості обертання керованого та некерованого насосів відповідно;  $\chi$  – стала інтегрування;  $M_{c1}$ ,  $M_{c2}$  – моменти навантаження на валах двигунів керованого та некерованого насосів відповідно;  $\hat{\eta}_{кн1}$ ,  $\hat{\eta}_{кн2}$  – оцінені значення ККД керованого та некерованого насосів відповідно;  $H$  – сумарний напір першого та другого насосу;  $H_{ст}$  – геодезична висота підйому води;  $\rho$  – густина води;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $t$  – час.

Наявність зворотних клапанів на виході кожного з насосів враховується наступним чином: якщо продуктивність насоса стає від'ємною, то вона приймається рівною нулю.

ККД насосів є нелінійними функціями, які залежать від положень робочих точок на напірних характеристиках  $\eta_i = f(Q_i, H_i)$ . В роботі ці залежності апроксимуються двошаровими нейронними мережами типу прямого поширення з 10, 1 нейронами та функціями активації гіперболічного тангенсу та лінійною у відповідних шарах [8]. Для навчання нейронних мереж використана база даних 4000 робочих точок з каталогу фірми виробника [9].

Привідні асинхронні двигуни насосів описуються нелінійними двофазними моделями в нерухомій системі координат статора а-в [10]. Перетворювач частоти реалізує квадратичний закон керування  $u/f^2 = \text{const}$ .

Структурна схема електромеханічної системи керування двома послідовно з'єднаними насосами водопостачання представлена на рис. 2.

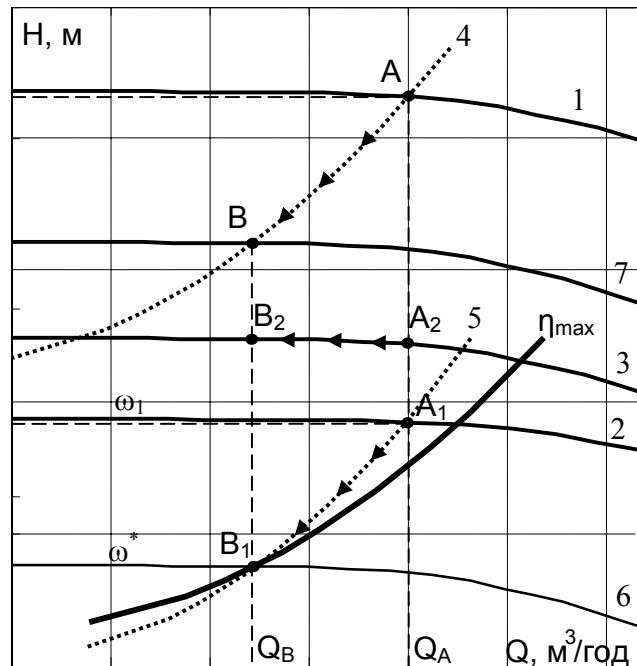


Рисунок 1 – Статичні характеристики двох послідовно з'єднаних насосів водопостачання та лінія максимального ККД керованого насосу

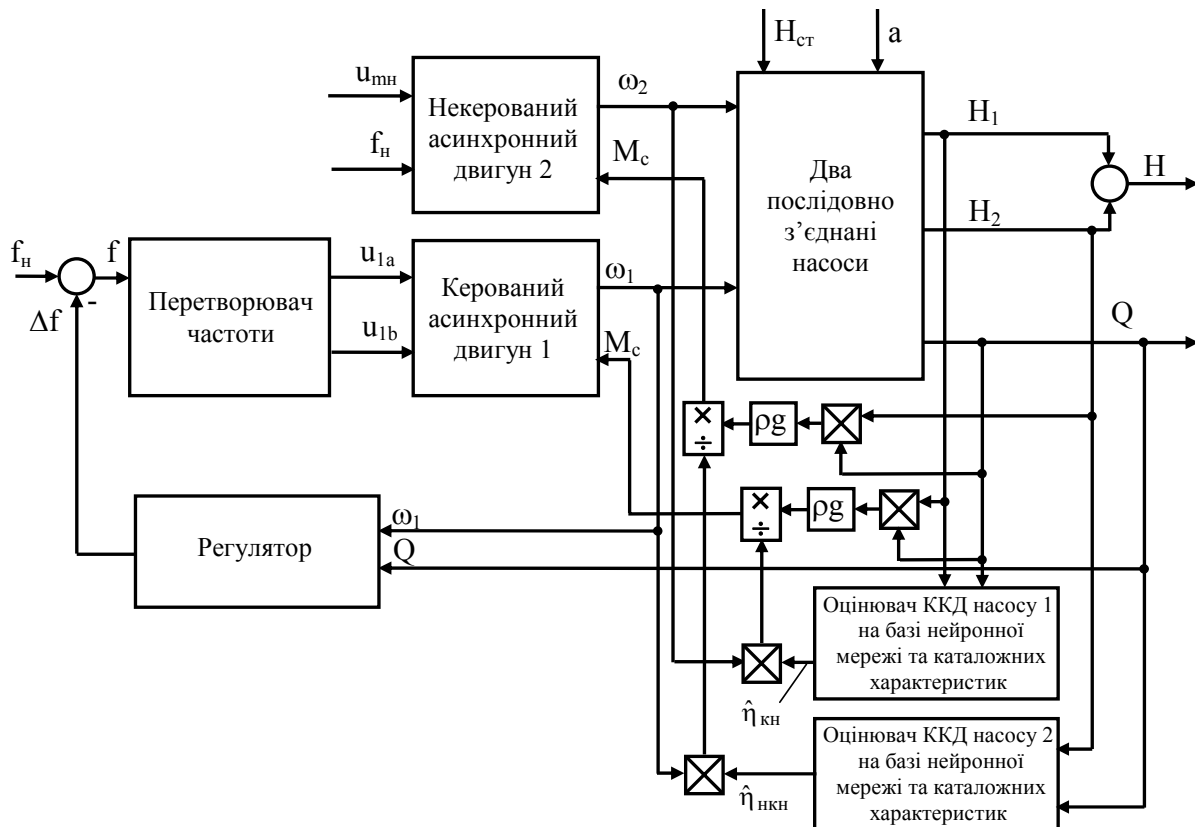


Рисунок 2– Структурна схема електромеханічної системи автоматичного керування двома послідовно з'єднаними насосами водопостачання

Регулятор, що представлений на структурній схемі 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  $\omega^*$ . Математичний опис регулятора має наступний вигляд:

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

$$\omega^* = k_1 Q^2 + k_2 Q + k_3,$$

де  $\Delta f$  – 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 однакові насоси фірми Vogel Pumpen CNX-100-65-400 [9] з наступними максимальними даними: потужність 156.1 кВт, напір 240 м, продуктивність 164.9 м<sup>3</sup>/год, ККД 62.9%, частота обертання 2900 об/хв. Номінальні дані приводних 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/(м<sup>2</sup>/год), приведений момент інерції на валах двигунів  $J = 1.4$  кг м<sup>2</sup>. Розрахункові параметри насосів на основі напірних характеристик є наступними:  $H_{01н} = H_{02н} = 235$  м,  $a_{н1} = a_{н2} = 9018$  1/(м<sup>5</sup>/с<sup>2</sup>).

Результати математичного моделювання системи автоматичного керування представлені на рис. 3.

Як видно з рис. 3, після пуску системи швидкість керованого асинхронного двигуна  $\omega_1$  зменшується, поки не досягне заданої  $\omega^*$ . ККД керованого насосу підвищується до максимально можливого значення 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. Далі в 40 і 50 секунд знову відбувається стрибкоподібне зменшення та збільшення гідравлічного опору відповідно. Регулятор працює аналогічно. Похибка відпрацювання заданої швидкості коливається в околі нуля.

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.

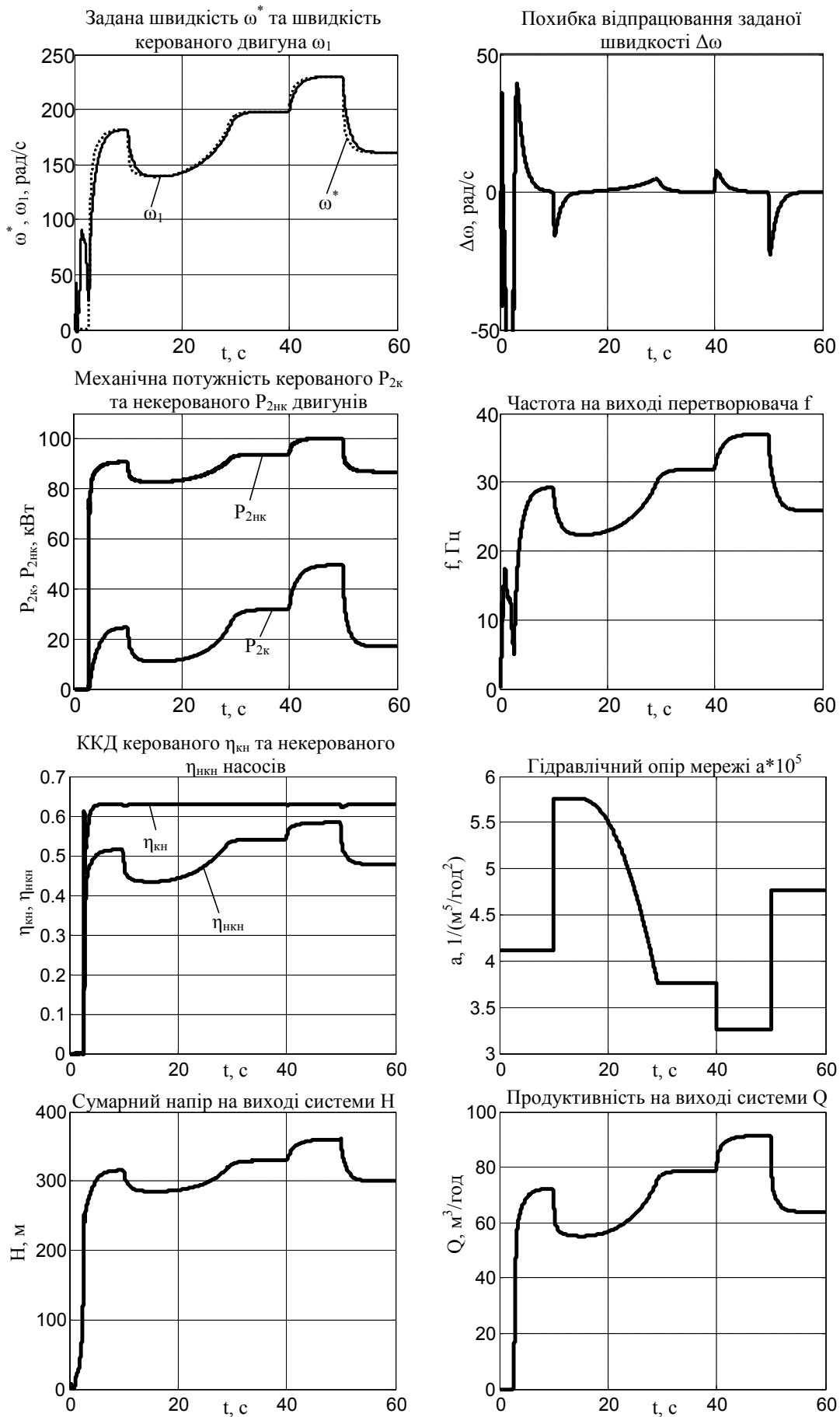


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів у системі керування

Зміна гідравлічного опору охоплює 50% від його номінального значення в сторони збільшення та зменшення, що моделює реальні гідравлічні системи. Таким чином зменшення механічної потужності на валу керованого двигуна при варіаціях гідравлічного опору 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 пуску системи з будь-якої робочої точки. При зміні гідравлічного опору мережі у межах 50% від його номінального значення під час роботи системи, регулятор також забезпечує відпрацювання заданої швидкості і 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 можливо впровадити у системах перекачування рідин, гідроакумулюючих електростанціях, системах поливу та зрошення, системах наповнення резервуарів тощо.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках / Б.С. Лезнов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 144 с.
2. 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.
3. Энергозберігаючі інтерактивні електромеханічні системи автоматичного керування насосними установками / [М.Г. Попович, М.В. Печеник, О.І. Кіселичник, О.Ф. Соколовський] // Електромашинобудування та електрообладнання. Тематичний випуск: проблеми автоматизованого електропривода. – 2006. — Випуск 66. – С. 311-314.
4. Pechenik M. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump based on flow rate measurement / M. Pechenik, O. Kiselychnyk, S. Buryan // Transactions of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute. Theory and Practice – Kharkiv: NTU «KPI», – 2010. – №28. –PP. 272-274.
5. Лозинський А.О. Синтез нейропродиктора системи керування електроприводом насосної станції на основі нейронних мереж прямого поширення сигналу / А.О. Лозинський, О.Ф. Кінчур // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Тематичний випуск. Проблеми автоматизованого електропривода. – 2007. – С. 299-300.
6. Pechenik M. Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation / M. Pechenik, O. Kiselychnyk, S. Buryan, D. Petukhova //Electrotechnic and Computer Systems. Scientific and technical journal, №03(79), – Odesa, 2011. – pp. 462-466.
7. Popovich M. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series / M. Popovich, O. Kiselychnyk, S. Buryan // Transactions of Kremenichuk State University. Kremenichuk. – KSU, 2010. – N3/2010 (62). – [part 2]. – PP.37-41.
8. 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.
9. ITT Industries. Vogel Select CD// Selection Program. – Jan. – 2009.
10. Marino R., Peresada S. and Tomei P. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors// IEEE Trans.on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42, No. 5. – P. 508-515.

#### REFERENCES

1. Leznov B.S. *Ekonomiya elektroenergii v nasosnykh ustanovkakh* [Energy savings in pump applications], Moskva, Energoatomizdat, 1991. -144с.
2. Shevchuk S.P. *Nasosni, ventilyatorni ta pnevmatichni ustanovki* [Pump, fan and pneumatic installation], NTUU «KPI», Kyiv, 2010. 308 p.
3. Popovich M.G., Pechenik M.V., Kiselychnik O.I., Sokolovskiy O.F. Energy interactive electromechanical automatic control pumping units. *Elektromashinobuduvannya ta elektroobladnannya. Tematichnyy vipusk: problemi avtomatizovanogo elektroprivoda*. Kyiv, 2006, 66, p.311-314.
4. Pechenik M. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump based on flow rate measurement / M. Pechenik, O. Kiselychnyk, S. Buryan // Transactions of National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute. Theory and Practice – Kharkiv: NTU «KPI», – 2010. – №28. –PP. 272-274.
5. Lozinsk'iy A.O., Kinchur O.F. Synthesis of neuropredictor control system of electric pump station based on neural networks and direct signal propagation. *Zbirnik naukovikh prats' Dniprodzherzhyn'skogo derzhavnogo tekhnichnogo universitetu. Tematichnyy vipusk. Problemi avtomatizovanogo elektroprivoda*. 2007, p. 299-300.
6. Pechenik M. Sensorless control of water supply pump based on neural network estimation / M. Pechenik, O.

Kiselychnyk, S. Buryan, D. Petukhova //Electrotechnic and Computer Systems. Scientific and technical journal, №03(79), – Odesa, 2011. – pp. 462-466.

7. 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.

8. Bur'yan S.O., Grishchuk T.V. Estimator of efficiency pump based on neural network and the characteristics of catalog. Elektromekhanichni ta energetichni sistemi, metodi modelyuvannya ta optimizatsii. *Zbirnik naukovikh prats' IKh Mizhnarodnoi nauково-tekhnichnoi konferentsii molodikh uchenikh i spetsialistiv u misti Kremenchuk* (Electromechanical and energy systems, methods of modeling and optimization. Proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists in Kremenchuk), 2011, KNU, p. 97-98.

9. ITT Industries. Vogel Select CD// Selection Program. – Jan. – 2009.

10. Marino R., Peresada S. and Tomei P. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors// IEEE Trans.on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42, No. 5. – P. 508-515.

Надійшла до редакції 22.03.2013

Рецензент: О.І. Толочко

С.А. БУРЬЯН

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

**Повышение энергоэффективности электромеханической системы автоматического управления последовательно соединенными насосами водоснабжения.** В статье рассмотрены вопросы повышения энергоэффективности системы управления двумя последовательно соединенными насосами водоснабжения. Один из насосов комплектуется частотно-управляемым асинхронным электроприводом. Приведена математическая модель энергоэффективной системы управления и проведено ее исследование методом математического моделирования.

**Ключевые слова:** насос, асинхронный электропривод, энергоэффективность, коэффициент полезного действия, водоснабжения, последовательное соединение насосов, производительность, напор, нейронная сеть, оценщик, математическое моделирование, ПИ-регулятор.

S. BURYAN

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”

**Improving Energy Efficiency of the Automatic Control Electromechanical System of the Pumps Connected in Series.** Pumping stations that provide our country with water are powerful consumers of electricity. Modern requirements of operation require the introduction of new energy technologies. The existing control system provides some level of energy efficiency, but the systems working in the mode of pumping large quantities of fluids without time limits have not been considered. The paper proposed automatic control electromechanical system for two pumps connected in series water, one stocked frequency controlled asynchronous drive, which achieved a certain level of energy efficiency through the development and implementation of efficiency pump controller, which increases to its maximum value in any mode. This maximum is achieved by changing the speed of induction motor drive and comparing the current speed of the speed with the maximum efficiency of the pump. The work presented static characteristics that illustrate the transition of the operating point on the line of maximum efficiency when changing speed of induction motor drive. The mathematical model of the series connected pumps with hydraulic network, mathematical model of electromechanical automatic control system and mathematical description of pump efficiency controller are presented. The latter is a conventional PI-controller and the equation that approximates the dependence of the maximum efficiency of the pump of speed of induction motor driving it and productivity. Also artificial neural networks, which are used to evaluate the efficiency of pumps based on pressure measurement and productivity at the system output, have been presented. Simulation of pumps control system with the power of 160 kW has shown that the controlled pump efficiency is increased to the maximum possible value, even with variations in hydraulic resistance network. Reduction of mechanical shaft power in controlled drive with variations in hydraulic resistance is possible from 30 to 40% of rated capacity. Efficiency of controlled pump is at the maximum, and the efficiency of uncontrolled pump depends on current location of the operating point. The proposed control system can implement in fluids pumping systems, storage power plants, irrigation systems, filling reservoirs more.

**Key words:** pump, asynchronous drive, energy saving, efficiency, water supply, serial connection of pumps, productivity, pressure, neural network estimator, simulation, PI-controller.