УДК 62-83:628.12

С. О. БУР'ЯН, канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;
М. В. ПЕЧЕНИК, канд. техн. наук, доц. НТУУ «КПІ»;
Д. О. БОДНАР, студ. НТУУ «КПІ»

ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ УСТАНОВКОЮ З ВАРІАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНОЇ МЕРЕЖІ

Вступ. Сучасна насосна установка (НУ) – це складна електромеханічна система, яка включає електромеханічні та електричні перетворювачі енергії, турбомеханізми, гідравлічну мережу та споживачів. Більшість таких установок на сьогоднішній день включає перетворювач частоти, використання якого дозволяє знизити втрати енергії в системі до 40% при порівнянні з нерегульованим електроприводом.

Основною регульованою координатою на виході насосної установки є тиск (напір). Проте при стабілізації тиску часто не враховуються зміни параметрів гідравлічної мережі, відхилення коефіцієнта корисної дії (ККД) від області максимального значення, коефіцієнтів турбомеханізмів, що описують їх характеристики, реальних графіків водоспоживання та впливу одного насосу на роботу інших. Це приводить до необхідності розробки такої системи, яка б забезпечила підвищення коефіцієнта корисної дії насосу до максимально можливого значення та підтримання тиску на виході установки на заданому рівні. Такий комплексний підхід до оцінки параметрів насосної установки дозволить обґрунтувати вибір його режиму роботи із врахуванням зміни ККД та варіацією параметрів гідравлічної мережі.

Постановка задачі. При вирішенні задач оптимізації роботи насосних установок є три основні складові: визначення функції завдання, побудова оптимальної моделі гідравлічної мережі та визначення її складових. Проаналізовані нижче роботи показують найбільш сучасні способи визначення цих складових. Функцію завдання можливо визначити, як мінімізацію витрат енергії на переміщення води. Вона в основному залежить від ККД насосу та тарифу, за яким розраховується вартість електроенергії. В свою чергу вартість електроенергії залежить від періоду часу. Тому деякі з авторів оптимізують енергоефективність насосних установок за допомогою розробки оптимального графіку роботи та систем, які можна налаштувати на цей графік. В даному випадку розроблена мережа розраховує найбільш ефективні проміжки часу на 24 години кожного дня [1]. Тобто її робота заснована на статистичному аналізі зібраних даних за минулий час (робочий день, вихідний, свято). Також можливий дещо інший принцип побудови оптимальної системи з врахуванням часу [2]. Тут використовується принцип мінімізації вартості енергії, якщо система задовольняє умовам гідромережі. Керуючий пристрій, в якому запрограмовано оптимальний алгоритм, вираховує при кожній зміні параметрів гідромережі або через певні проміжки часу енергетичну ефективність роботи насосу та налаштовується на найбільш вигідний режим для його роботи. Ще один спосіб оптимального керування насосним комплексом, запропонований у [3], побудований на основі оптимального критерію з врахуванням графіків водопостачання та зміни характеристик обладнання при його експлуатації. Оптимальний критерій, який мінімізується, в даному випадку враховує відхилення від заданого значення тиску та втрати потужності в мережі.

Багато робіт, які присвячені підвищенню енергоефективності за рахунок максимізації ККД насосу, не враховують технологічну потребу необхідного тиску, а лише направлені на зменшення споживаної енергії. У такому випадку енергоефективність системи незаперечно збільшується, а технологічні параметри, такі як тиск або його витрати, постійно змінюються. Виходячи з цього, розробка системи керування, що враховуватиме необхідний тиск та забезпечує підвищену енергоефективність є актуальним завданням.

Матеріали дослідження. Основною метою при побудові оптимального регулятора є пошук такої точки статичних характеристик, в якій при певних параметрах гідромережі різниця між заданим і реальним тиском буде мінімально можливою та ККД насосної установки максимально можливим одночасно. Тому при виборі критерію оптимальності необхідно виконати дві умови, які б гарантували виконання поставленої задачі керування: технологічної та енергетичної.

Технологічна складова критерію має забезпечувати мінімізацію різниці заданого та реального напору на виході насосної установки і описується наступним виразом:

$$\Delta H(t) = \left| H^*(t) - H_n(t) \right| , \quad (1)$$

де $H^*(t)$ – задане (необхідне) значення напору на виході насосної установки; $H_п(t)$ – поточне (реальне) значення напору на виході НУ. Вираз (1) взято за модулем для уникнення від'ємного значення неузгодженості напорів, коли реальне значення напору більше за необхідне.

Енергетична складова в свою чергу має зменшити енергетичні втрати системи, що досягається за допомогою підвищення ККД до максимально можливого значення у певній робочій точці. Вираз, що описує енергетичної складову буде мати вигляд

$$\Delta\eta(t) = \eta^*(t) - \eta(t) , \quad (2)$$

де $\eta^*(t)$ – максимальне значення ККД для НУ; $\eta^*(t)$ – поточне значення ККД насосу.

© С.О.Бур'ян, М.В.Печеник, Д.О.Боднар, 2015

Таким чином критерій оптимальності, який задовольняє технологічній та енергетичній складовим, описаним виразами (1) та (2) відповідно, буде мати наступний вигляд:

$$I = \int_0^t (\Delta H(t) + k_r \Delta \eta(t))dt \to min\ , \tag{3}$$

де k_r – вагова константа за ККД насосу. k_r введена для того, щоб відрегулювати вагу необхідного параметру у системі згідно поставленого технічного завдання. Тобто, якщо у технічному завданні пріоритет має енергоефективність системи, то необхідно збільшувати вагову константу, а якщо пріоритетна технологічна складова – зменшувати.

За обраним критерієм оптимальності будується регулятор, який має визначати оптимальну робочу точку для заданого тиску. Тому виходом для цього регулятора має слугувати швидкість, яка задається шляхом зміни частоти обертання привідного асинхронного двигуна, на якій насосна установка буде працювати з максимально можливою енергоефективністю при умові, що різниця між заданим та поточним значеннями тиску будуть мінімізуватись.

Для оцінки заданої швидкості розроблено дві нейронні мережі за допомогою пакету прикладних програм MatLab з редактором нейронних мереж (Network/Data/Manager). Перша нейронна мережа використовується для оцінки мінімального значення оптимального критерію, вхідним її масивом було значення напору H_{min}, при якому мінімізувався критерій оптимальності, а вихідним – масив значень критерію оптимальності I_{min}. Призначення другої нейронної мережі – оцінка необхідної швидкості, вона мала два вхідних навчальних масиви: оцінене значення оптимального критерію $\hat{I}_{min}$, яке отримано з першої нейронної мережі та заданого напору H^*. Вихідним масивом був масив значень $\hat{\omega}^*$ – оціненої заданої швидкості. Для навчання нейронних мереж було виконано моделювання насосної установки при зміні швидкості від номінальної до половини номінальної для різних значень заданого напору. Заданий напір змінювався від 61 м до 16.3 м з кроком 2,5 м. При цьому визначалися мінімальні значення критерію оптимальності та час, при якому це мінімальне значення досягається. Далі в отриманий час визначалися значення швидкості та напору. По отриманим значенням оптимального критерію швидкості та напору складалися навчальні масиви для нейронних мереж. Дана процедура була виконана для різних вагових констант k_r = 1, 2, 4, 6, 10. Графіки, побудовані по навчальним масивам, для першої та другої нейронних мереж представлені на рис. 1 та рис. 2 відповідно.

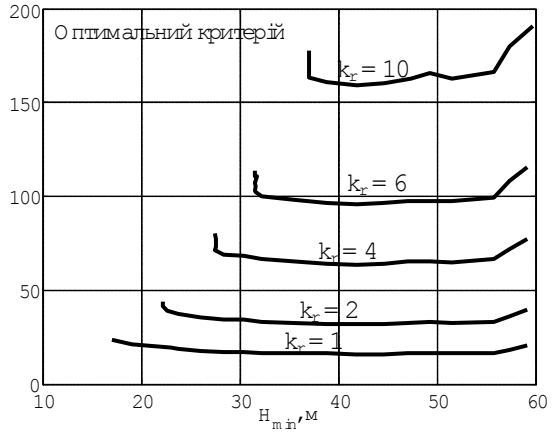

Рис. 1 – Криві навчання нейронної мережі для оцінки оптимального критерію

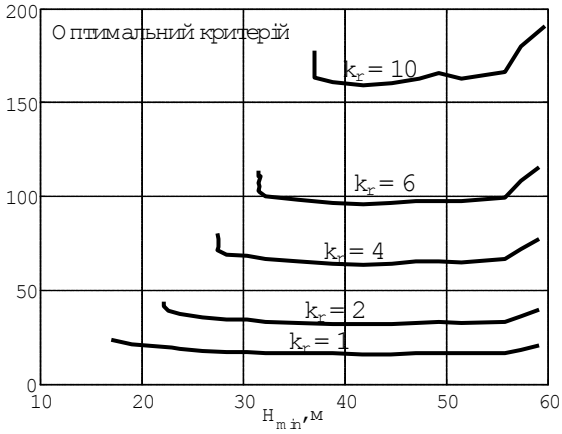

Рис. 2 – Криві навчання нейронної мережі для оцінки заданої швидкості

Після тренувань отримані нейронні мережі для кожної вагової константи використано у математичній моделі електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою.

1. Розглянемо склад та принцип роботи оптимального регулятора. Для його роботи потрібно вимірювати реальне значення тиску H та швидкості ω. На вхід регулятора подається значення тиску, за допомогою якого на основі нейронних мереж оцінюється значення оптимального критерію. Отримане значення критерію та заданого тиску подаються на вхід нейронної мережі для оцінки необхідної заданої швидкості. Оцінена задана швидкість, в свою чергу, порівнюється з реальною швидкістю у системі, після чого реальна швидкість коректується до оціненої заданої за допомогою ПІ регулятора. Отримана швидкість є швидкістю регулювання ω_p та дорівнює оціненій заданій швидкості $\hat{\omega}^*$. Таким чином вираз для ω_p має наступний вигляд:

$$\omega_p = \left[\omega - \hat{\omega}(H^*, H, \hat{I}_{min}(H))\right](K_p + 1/T_i p)\ , \tag{17}$$

де K_p, T_i – коефіцієнти ПІ-регулятора.

Структурна схема електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою з викори-

станням оптимального регулятора представлена на рис. 3.

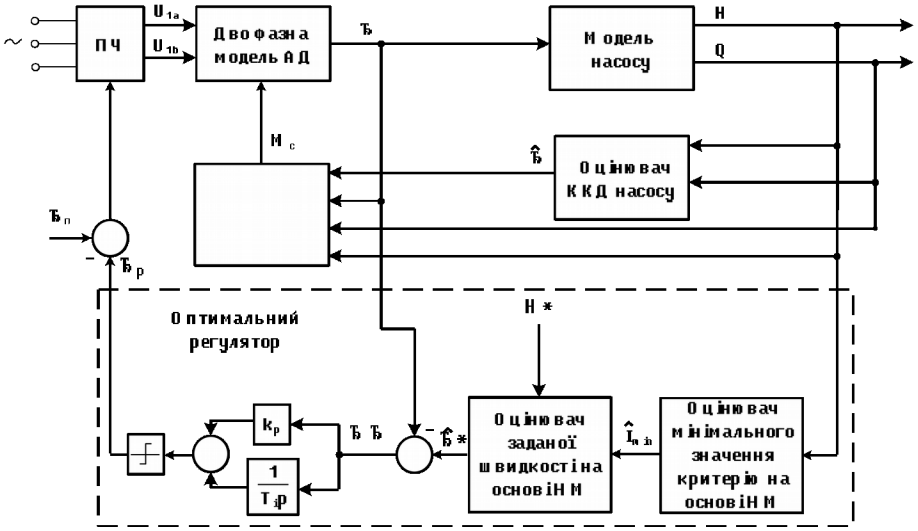

Рис. 3 – Структурна схема оптимальної системи керування насосною установкою

Математична модель одинарної насосної установки описується нелінійним диференційним рівнянням першого порядку

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0н}}{\chi\,\omega_н^2}\omega^2 - \frac{H_{ст}}{\chi} - \frac{1}{\chi}(a_н + a)Q^2, \tag{4}$$

а також рівнянням для визначення напору насосу

$$H = \frac{H_{0н}}{\chi\,\omega_н^2}\omega^2 - a_н Q^2, \tag{5}$$

та моменту навантаження привідного двигуна

$$M_c = \frac{\rho g Q H}{\eta_{нас}\,\omega}, \tag{6}$$

де Q – продуктивність насосу; $H_{0н}$ – напір при нульовій подачі насосу на номінальній швидкості; ω – швидкість обертання насосу; $\omega_н$ – номінальна швидкість обертання насосу; χ – стала інтегрування насосу; $H_{ст}$ – геодезична висота підйому води; $a_н$ – номінальний гідравлічний опір насосу; a – гідравлічний опір мережі; M_c – момент навантаження на валу двигуна насосу; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; $\eta_{нас}$ – ККД насосу; Н – напір насосу; t – час.

Асинхронний двигун описується системою нелінійних диференціальних рівнянь в нерухомій системі координат статора a–b

$$\frac{di_{1a}}{dt} = -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta\omega p_n\psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \tag{7}$$

$$\frac{di_{1b}}{dt} = -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} - \beta\omega p_n\psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \tag{8}$$

$$d\frac{\psi_{2a}}{dt} = -\alpha\psi_{2a} - \omega p_n\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \tag{9}$$

$$d\frac{\psi_{2b}}{dt} = -\alpha\psi_{2b} + \omega p_n\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \tag{10}$$

$$M = \frac{3}{2}\frac{p_n L_m}{L_2}(\psi_{2a} i_{1b} - \psi_{2b} i_{1a}), \tag{11}$$

$$d\frac{\omega}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_c), \tag{12}$$

де $(i_{1a},i_{1b})^T$, $(u_{1a},u_{1b})^T$, $(\psi_{2a},\psi_{2b})^T$ – компоненти векторів струму статора, напруги статора та потокозчеплення ротора; M – електромагнітний момент двигуна; M_c – момент навантаження, що створюється насосом; L_2 – індуктивність ротора; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, p_n – кількість пар полюсів, J – сумарний момент інерції; α, β, σ, γ – додатні константи.

Перетворювач частоти описується наступною системою рівнянь:

$$u_{1a} = u_m\cos\Theta, \tag{13}$$

$$u_{1b} = u_m\sin\Theta, \tag{14}$$

$$\Theta = 2\pi\int_0^t f dt, \tag{15}$$

$$u_m^* = u_0 + (u_m - u_0)(f^*)^2 / f_н^2, \quad (16)$$

де u_m – амплітудне значення напруги; Θ – електричний кут; u_m^* – амплітудне значення заданої напруги; f – частота напруги статора; f^* – задана частота; u_0 – напруга зміщення, $f_н$ – номінальна частота мережі.

Головним недоліком моделі насосної установки, що представлена виразами (4)-(6) є те, що в ній не враховується зміна ККД насосу $\eta_{нас}$, що є справедливим тільки, якщо насос працює з незмінними $H_{ст}$ та а в околі робочої точки з максимальним ККД. Проте зазвичай параметри гідромережі змінні, тому необхідно розробити процедуру врахування зміни ККД насосу із зміною положення робочої точки в площині напірних характеристик. Тому було розроблено уточнену математичну модель, яка враховує зміну ККД системи на основі нейронних мереж. Оцінка ККД відбувається на основі продуктивності та тиску на виході насосного комплексу [4].

Для перевірки працездатності розробленої системи та оцінки її енергоефективності було проведено математичне моделювання у різних режимах роботи. Дослід проводився для плавного закону зміни гідравлічного опору та для різних вагових констант k_r =1, 2, 4, 6, 10. Час моделювання у досліді t =100 с. При цьому значення гідравлічного опору плавно змінювалося у межах від a_{max} = 180560 год^2/м^5 до a_{min} =100510 год^2/м^5. Характер зміни гідравлічного опору та результати досліду представлені на рис. 4.

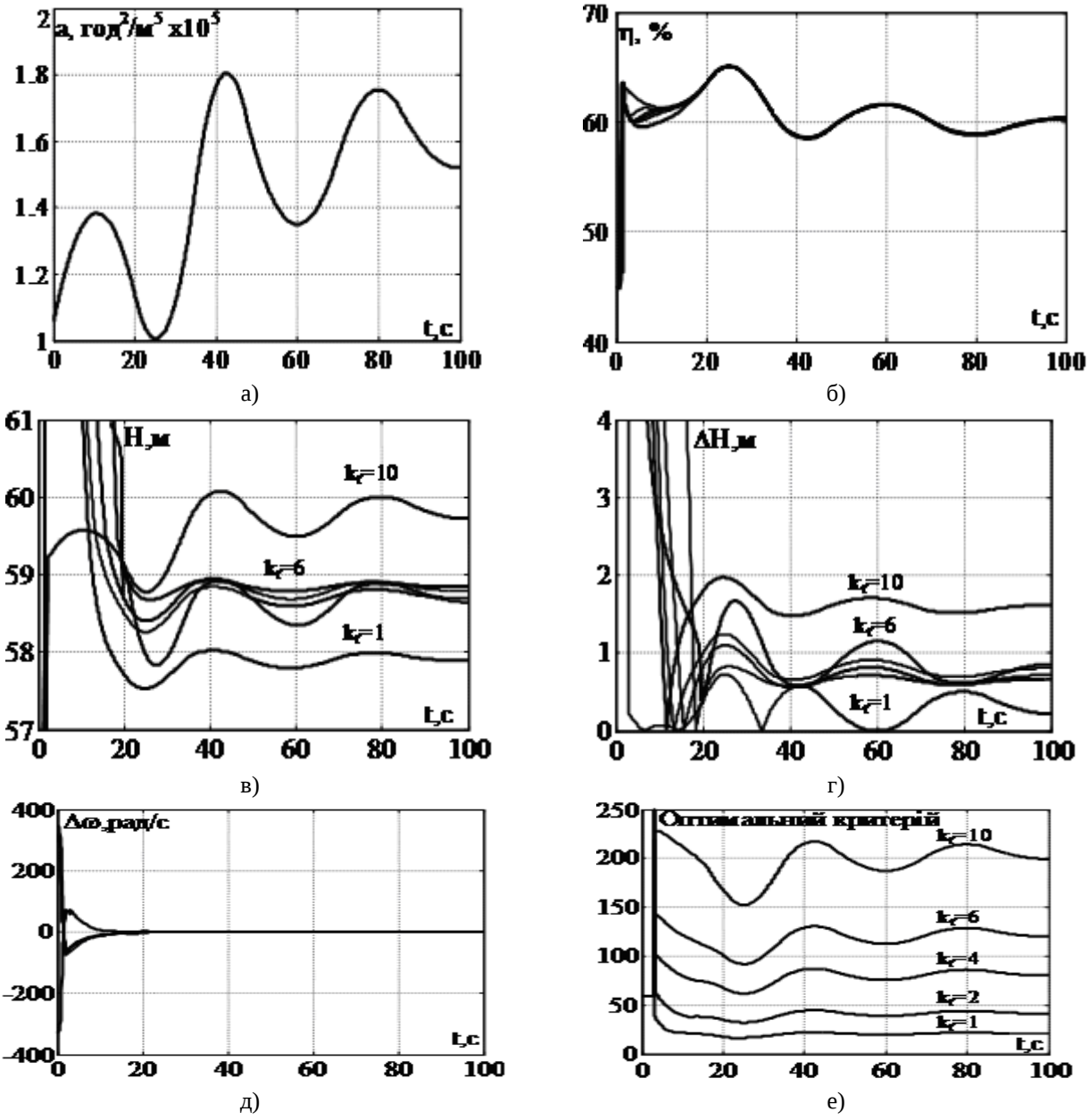

Рис. 4 – Результати моделювання: а) – графік зміни гідравлічного опору; б) – перехідний процес ККД насосу; в) – перехідний процес тиску насосу; г) – похибка по тиску; д) – похибка по швидкості;

е) – перехідний процес значення оптимального критерію

З аналізу отриманих результатів видно, що похибка по швидкості (представлена на рис. 4, д) нульова, отже регулятор працездатний при плавних варіаціях опору гідромережі. ККД насосу підвищується до максимально-можливого значення (рис. 4, б), яке визначається положенням робочої точки. При збільшенні вагової константи з 1 до 10 збільшується значення оцінки оптимального критерію та дещо збільшується значення ККД системи (приблизно на 0,01 при роботі системи з k_r = 10), але це призводить до збільшення похибки по тиску, що складає 1 м при роботі з k_r = 10 відносно k_r = 1.

Також було проведено дослідження отриманої системи в порівнянні з системою стабілізації тиску при законі зміни гідравлічного опору, представленому на рис. 5, а. У системі стабілізації тиск підтримувався на рівні H^* = 30 м., H^* = 40 м. та H^* = 50 м., а розроблена оптимальна система промодельована з ваговою константою k_r = 1 для H^* = 50 м.

Результати досліду представлені на рис. 5.

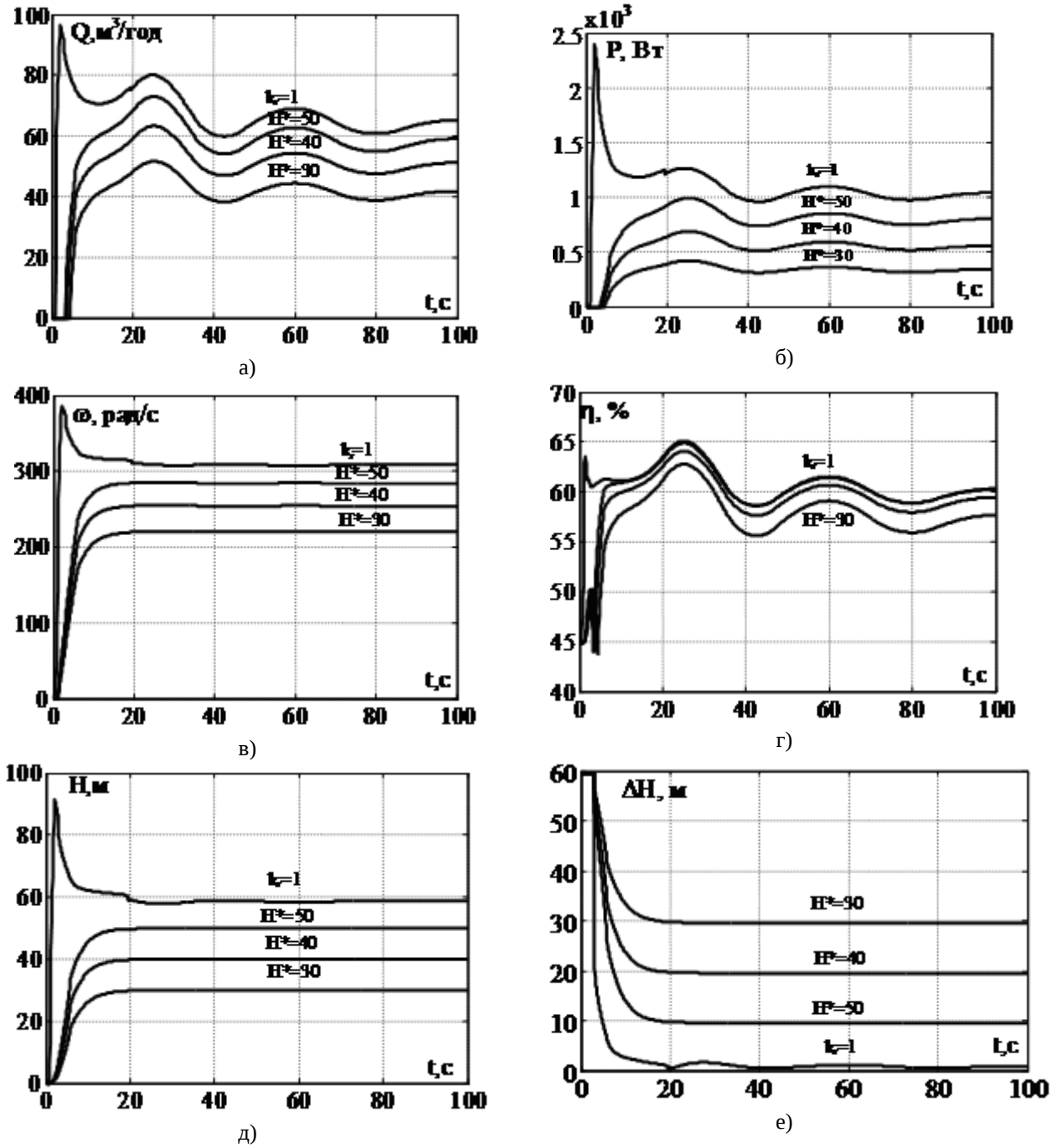

Рис. 5 – Результати моделювання для другого досліду: а) – перехідний процес продуктивності насосу; б) – перехідний процес потужності насосу; в) – перехідний процес швидкості обертання привідногодвигуна

насосу г) – перехідний процес ККД насосу; д) – перехідний процес тиску насосу е) – похибка по тиску

Аналіз отриманих результатів показав, що система з використанням оптимального регулятора має найвищій ККД насосу (підвищується до 3% від максимального значення) при варіаціях гідравлічного опору мережі (рис. 5, г) у порівнянні з системою стабілізації тиску для різних варіантів заданого тиску. Для оптимальної системи похибка за тиском коливалась в межах 1 м.

Висновки. У даній роботі розроблено систему оптимального керування насосною установкою на основі технологічної та енергетичної умов при варіаціях параметрів гідравлічної мережі. Дослідження системи методом математичного моделювання показали, що при плавній зміні гідравлічного опору для різних вагових констант витрати електричної енергії при використанні розробленого регулятора зменшуються в середньому на 3%. Порівняння із системою стабілізації тиску показали, що при роботі оптимальної системи ККД насосу збільшується на 0.7–1%, а похибка за тиском коливається у межах 1 м. Отримані результати доцільно впроваджувати у системи із заздалегідь відомим графіком водоспоживання для більш точної оцінки необхідної швидкості обертання.

Список літератури: **1**. *Piotr Skworcow* Optimal pump scheduling with pressure control aspects: Case studies / *Piotr Skworcow, HossamAbdelMeguid, Bogumil Ulanicki & Peter Bounds* // Integrating Water Systems Boxall & Maksimovi´c. – London – 2010. – pp. 113-119. **2.** *Paul F. Boulos* Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms / *Paul F. Boulos, Zheng Wu, Chun Hou Orr, Michael Moore, Paul Hsiung* – 2009 – pp. 11-17. **3**.Алексеева Ю.А. Динамические режимы экстремальной системы автоматического управления гидротранспортным комплексом / *Ю.А. Алексеева, Т.В.Коренькова* // Наукові праці Донецького національного технічного університету №11 – Донецьк. – 2011р. – с.24-30. **4.** *Бур'ян С.О.* До питання визначення коефіцієнта корисної дії насосу / *С.О. Бур'ян, Д.О. Боднар* // Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XII Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 10-11 квітня 2014 р. – Кременчук, КрНУ, 2014. – с. 134-135.

Bibliography(transliterated): **1**. *Piotr Skworcow* Optimal pump scheduling with pressure control aspects: Case studies / *Piotr Skworcow, HossamAbdelMeguid, Bogumil Ulanicki & Peter Bounds* // Integrating Water Systems Boxall & Maksimovi´c. – London – 2010. – pp. 113-119. **2.** *Paul F. Boulos* Optimal pump operation of water distribution systems using genetic algorithms / *Paul F. Boulos, Zheng Wu, Chun Hou Orr, Michael Moore, Paul Hsiung* – 2009 – pp. 11-17. **3**. Alekseeva Yu.A. "Dinamicheskie rezhimyi ekstremalnoy sistemyi avtomaticheskogo upravleniya gidrotransportnyim kompleksom.": Naukovi pratsi Donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu №11. 2011r.24-30.Print. **4.** *Bur'yan S.O.* "Do pytannya vyznachennya koefitsiyenta korysnoyi diyi nasosu." Elektromekhanichni ta enerhetychni systemy, metody modelyuvannya ta optymizatsiyi.: Zbirnyk naukovykh prats' KhII Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh i spetsialistiv u misti Kremenchuk 10-11 kvitnya 2014 r. KrNU. 2014. 134-135.Print.

Надійшла (received) 15.07.2015