

## ЕКСТРЕМАЛЬНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ НАСОСНИМ КОМПЛЕКСОМ ЗА КРИТЕРІЄМ МАКСИМАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

**М.В. Загірняк**, академік АПН України, **Ю.О. Алексєєва**, **І.С. Конох**, канд.техн.наук,  
**Т.В. Коренькова**, канд.техн.наук

**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського,**  
**вул. Першотравнева, 20, Кременчук, 39600, Україна, e-mail: [aljualeks@gmail.com](mailto:aljualeks@gmail.com)**

*Запропоновано критерій максимальної ефективності екстремальної системи автоматичного керування насосним комплексом, що враховує вимоги технологічного процесу, питоме енергоспоживання і витрату ресурсу електрогідравлічного обладнання. Обґрунтовано вибір вагових коефіцієнтів критерію оптимальності. Розроблено структурну схему моделі екстремальної системи керування насосним комплексом крокового типу з пошуковим алгоритмом. Виконано аналіз енергоефективності запропонованої системи з системою стабілізації тиску в контрольній точці трубопроводної мережі на базі ПД-регулятора. Проведено оцінку впливу тривалості експлуатації насоса на енергетичні характеристики роботи насосного комплексу. Бібл. 10, рис. 5.*

**Ключові слова:** насосний комплекс, екстремальна система керування, максимальна ефективність.

**Вступ.** Сучасні системи автоматичного керування (САК) насосних комплексів (НК) промислового і комунального водопостачання на базі частотно-регульованих електроприводів (ЕП) спрямовані в більшості випадків на вирішення технологічних задач: стабілізацію напору (подачі) на виході НК або в контрольній точці трубопроводу, підтримання рівня у водонапірній башті і т.п. Такі системи у порівнянні з нерегульованим ЕП НК забезпечують необхідний мінімум напору в гідромережі, виключають перевитрату рідини і виток в трубопроводі, дають змогу знизити споживання електроенергії.

Ще більш ефективним є впровадження оптимальних САК НК, що враховують, крім технологічного, енергетичний критерій роботи системи: максимально можливий ККД насоса при стабілізації тиску в трубопроводній мережі або мінімум сумарних втрат в ЕП у разі відпрацювання необхідного графіка зміни витрати води у часі [1, 2]. Однак такого роду системи спрямовані на вирішення лише локальних задач оптимізації при забезпеченні вимог технологічного процесу і не дають змогу підвищити ефективність роботи електрогідравлічного комплексу в цілому. Крім того, при їхній розробці критерій оптимальності належним чином не проходить процес верифікації та валідації.

**Мета роботи.** Підвищення енергоефективності та надійності насосного комплексу шляхом розробки екстремальної системи автоматичного керування, яка забезпечує мінімізацію споживаної електроенергії і витрати ресурсу електрогідравлічного обладнання при стабілізації технологічного параметра.

**Матеріал і результати досліджень.** Для отримання максимальної ефективності експлуатації оптимальних САК слід враховувати витрати ресурсу використовуюваного обладнання з урахуванням поточного режиму роботи [5]. Відомо, що при експлуатації НК у номінальному режимі витрати ресурсу (зношення обладнання) будуть відповідати паспортному часу напрацювання на відмову. При необхідності зміни технологічних параметрів НК ресурс електрогідравлічного обладнання буде витрачатися з різною інтенсивністю залежно від використовуюваного методу регулювання: дроселювання, зміни кута повороту лопатей або частоти обертання робочого колеса насоса.

Таким чином, оптимальна САК НК комунального водопостачання повинна відповідати наступним вимогам: розузгодження за технологічним параметром не повинно перевищувати заданої точності (0,1÷5) %, питоме енергоспоживання і витрата ресурсу електрогідравлічного обладнання НК (двигун, насос, трубопровід) – мінімальні. Максимальна ефективність роботи САК НК може бути досягнута шляхом формування критерію оптимальності виду

$$I = (a_1 I_1 + a_2 I_2 + a_3 I_3) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $I_1, I_2, I_3$  – показники ефективності, що характеризують технологічну, енергетичну і ресурсну складові критерію оптимальності відповідно;  $a_1, a_2, a_3$  – вагові коефіцієнти.

Стосовно НК комунального водопостачання доцільно розглядати статичні режими, бо зміна параметрів у гідромережі протягом доби відбувається досить рідко (до десяти разів на добу), при цьому тривалість перехідних процесів не перевищує декількох десятків секунд. Відповідно критерій (1) дає змогу враховувати поточні миттєві показники ефективності на відміну від інтегральних критеріїв, які оцінюють перехідні режими на деякому часовому інтервалі.

Розглянемо математичну формалізацію складових критерію (1). Технологічний показник ефективності НК є ступеневою функцією виду

$$I_1 = \left( \frac{H_{crec} - H_{ccur}}{H_{psn}} \right)^n, \quad (2)$$

де  $H_{crec}$ ,  $H_{ccur}$  – необхідне і поточне значення напору в мережі споживача відповідно;  $H_{psn}$  – номінальне значення напору на виході насосної станції;  $n$  – показник ступеня.

Таке представлення технологічної складової критерію оптимальності дає змогу отримати мінімальне значення цього показника у разі поточного розузгодження напору ( $H_{crec} - H_{ccur}$ ), що не перевищує допустиме значення відхилення напору  $\Delta H_p$  у контрольній точці трубопроводної мережі

$$\begin{cases} (a_1 I_1 + a_3 I_3) > a_2 I_2 \text{ при } (H_{crec} - H_{ccur}) > \Delta H_p; \\ (a_1 I_1 + a_3 I_3) < a_2 I_2 \text{ при } (H_{crec} - H_{ccur}) \leq \Delta H_p. \end{cases} \quad (3)$$

За енергетичну складову критерію (1) обрано показник питомої витрати електроенергії на перекачку одного кубічного метра води. Це обумовлено тим, що для регульованого ЕП насоса залежно від його характеристик, а також характеристик трубопроводної мережі існує обмежений інтервал зміни частоти обертання, на якому питоме енергоспоживання мінімальне [3]. Таким чином, енергетична складову критерію оптимальності повинна забезпечувати мінімум питомого енергоспоживання НК

$$I_2 = P_{con} / Q_{ps}, \quad (4)$$

де  $P_{con}$  – споживана насосним агрегатом (НА) потужність;  $Q_{ps}$  – подача на виході насосної станції.

Як зазначено вище, збільшення подачі призводить до непропорційного зростання зношення електрогідравлічного обладнання. Так, наприклад, зменшення частоти обертання насоса знижує зношення ущільнень і підшипників технологічного механізму, що відображає індекс надійності  $R_i$  заводу-виготовлювача насоса [6]:  $R_i = F_R F_D F_Q$ , де  $F_R$ ,  $F_D$ ,  $F_Q$  – коефіцієнти, що залежать від частоти обертання, діаметра робочого колеса насоса і подачі насоса відповідно. При зниженні подачі на 50 % від номінальної шляхом зміни частоти обертання НА індекс надійності  $R_{iv} = 0,54$  ( $F_{Rv} = 0,6$ ;  $F_{Dv} = 0,9$ ;  $F_{Qv} = 1,0$ ) у 3,75 рази вище в порівнянні з дроселюванням  $R_{iv} = 0,144$  ( $F_{Rv} = 0,2$ ;  $F_{Dv} = 0,8$ ;  $F_{Qv} = 0,905$ ) при тих самих параметрах НК. Таким чином, ресурсна складову критерію оптимальності повинна оцінювати збільшення або зменшення витрати ресурсу основного обладнання в залежності від поточного режиму роботи

$$I_3 = s_i s_v s_q, \quad (5)$$

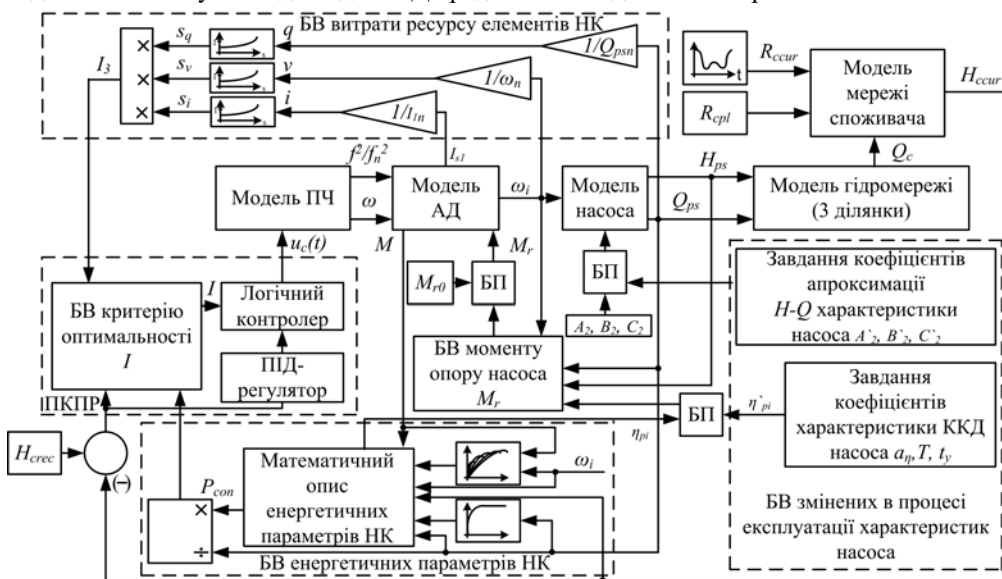
де  $s_i = f(i)$ ,  $s_v = f(v)$ ,  $s_q = f(q)$  – відносні витрати ресурсу елементів НК у залежності від зміни струму статора асинхронного двигуна (АД), частоти обертання і подачі насоса відповідно.

Мінімальне значення ресурсної складової критерію (1) визначається з умови

$$\begin{cases} a_2 I_2 \leq a_3 I_3 \text{ при } (H_{crec} - H_{ccur}) \leq \Delta H_p; & I_3 \leq 1; \\ a_1 I_1 > a_3 I_3 \text{ при } (H_{crec} - H_{ccur}) > \Delta H_p. \end{cases} \quad (6)$$

На рис. 1 показано структурну схему моделі екстремальної САК НК, яка включає моделі: перетворювача частоти (ПЧ), асинхронного двигуна, насоса, гідромережі, споживача, математичний опис яких наведено в [7, 9]; пристрій керування і прийняття рішень (ПКПР), що містить блок визначення (БВ) критерію оптимальності, логічний контролер, ПІД-регулятор; блоки визначення витрати ресурсу елементів НК, енергетичних параметрів НК і змінених у процесі експлуатації характеристик насоса; блоки перемикання (БП).

ПЧ формує квадратичний закон зміни напруги та частоти  $U/f^2 = \text{const}$  і описується аперіодичною ланкою першого порядку, диференціальне рівняння якого має вигляд  $T_{fc} df(t)/dt + f(t) = k_{fc} f(t)$ , де  $k_{fc}$ ,  $T_{fc}$  – коефіцієнт передачі і стала часу ПЧ відповідно. АД представлено відомою лінеаризованою математичною моделлю.



Насос описується диференціальним рівнянням з урахуванням інерційних властивостей турбомеханізму  $T_{cp} dH_{ps}(t)/dt + H_{ps}(t) = k_{cp} H_{cp}(t)$ , де  $k_{cp}$ ,  $T_{cp}$  – коефіцієнт передачі і стала часу насоса відповідно.

При моделюванні гідродинамічної мережі застосовується принцип електрогідравлічної аналогії, а опис хвильових процесів у трубопроводі базується на використанні телеграфних рівнянь і приведення їх до різнице-вих залежностей. Мате-

Рис. 1

матичний опис процесів перетворення енергії в силовому каналі НК при зміні технологічних параметрів наведено у [8, 10].

Дослідження проводилися для водопровідної НС другого підйому м. Кременчука з параметрами перетворювача частоти:  $f_n=50$  Гц;  $T_{fc}=0,3$  с;  $k_{fc}=1$ ; відцентрового насоса:  $Q_n=2000$  м<sup>3</sup>/год;  $H_n=100$  м;  $P=760$  кВт;  $n_n=980$  об/хв;  $T_{cp}=0,106$  с;  $k_{cp}=1$ ;  $A_2=118$ ;  $B_2=20,384$ ;  $C_2=-94,888$ ; асинхронного двигуна:  $P=800$  кВт;  $J=7,3$  кгм<sup>2</sup>;  $\omega_n=103,254$  с<sup>-1</sup>;  $\beta=2856$ ;  $T_e=0,194$  с; трубопроводу і споживача:  $d=0,8$  м;  $k_e=2$  мм;  $T_c=4$  с;  $H_s=40$  м;  $R_{cpl}=55$  с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;  $l=20,28$ ;  $c=4264$ ;  $r=0,62$ ;  $\Delta H_p=1,5$  м.

Виконання логічних умов (3) і (6) пояснюється кривими зміни складових критерію оптимальності у часі (рис. 2), отриманими на математичній моделі екстремальної САК НК (рис. 1). У моделі задаються тестові сигнали показників ефективності критерію (1) синусоїдальної форми з різною частотою і амплітудою, параметри яких знаходяться в області допустимих значень  $I_1 \in [14; 20]$ ,  $I_2 \in [0,2; 0,4]$ ,  $I_3 \in [0; 2]$ . Шляхом перебору різних комбінацій значень складових критерію визначається режим роботи НК з максимальною ефективністю. У разі, коли  $(H_{crec}-H_{ccur}) \leq \Delta H_p$ , превалюють у визначенні значення критерію (1) енергетична і ресурсна складові; при  $(H_{crec}-H_{ccur}) > \Delta H_p$  – пріоритетним є забезпечення технологічного завдання.

Максимальна ефективність для даної НК досягається введенням критерію оптимальності виду

$$I = a_1 \left( (H_{crec} - H_{ccur}) / H_{psn} \right)^n + a_2 P_{con} / Q_{ps} + a_3 s_i s_v s_q, \quad (7)$$

де  $H_{crec}=17$  м;  $n=6$ ;  $a_1=80$ ,  $a_2=20$ ,  $a_3=7$ .

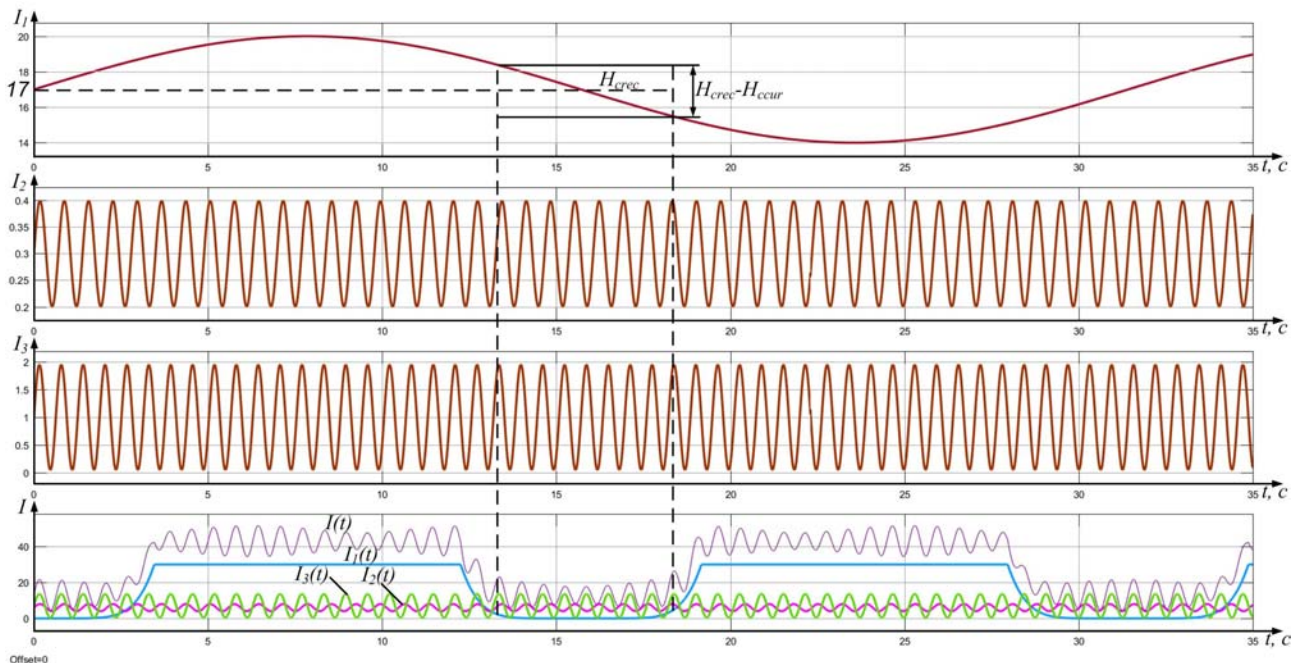


Рис. 2

Завдання оптимізації (7) вирішується за допомогою екстремальної САК НК (рис. 1), керуючим впливом  $u_c(t)$  в якій є частота  $f(t)$  мережі живлення ЕП насоса, а напруга  $U(t)$ , підведена до електродвигуна, змінюється відповідно до закону частотного керування  $U/f^2=\text{const}$ .

Оскільки екстремум функції (7) знаходиться в області, близькій до точки стабілізації тиску, то для прискорення його пошуку доцільним є спочатку відпрацювання розузгодження за тиском, а потім пошук екстремуму відповідно до алгоритму роботи екстремальної системи керування крокового типу.

Логіку функціонування екстремальної САК НК відображає UML-діаграма станів (рис. 3), яка передбачає три режими: ручне управління з директивним завданням частоти обертання приводного двигуна, автоматичну стабілізацію тиску з використанням ПД-регулятора, екстремальне керування. У разі вибору останнього варіанта виконується фіксація системою початкових параметрів і запуск основного циклу (рис. 3), в якому проводиться: перевірка умови стабілізації тиску – якщо розузгодження перевищує порогове значення, то виконується його стабілізація; запуск пошукової процедури визначення значення опору  $R_{ccur}$  гідромережі, еквівалентного необхідній подачі споживача і, безпосередньо, пошук екстремуму критерію оптимальності; оцінка коректності результату модельного пошуку шляхом порівняння з роботою реального технологічного об'єкта.

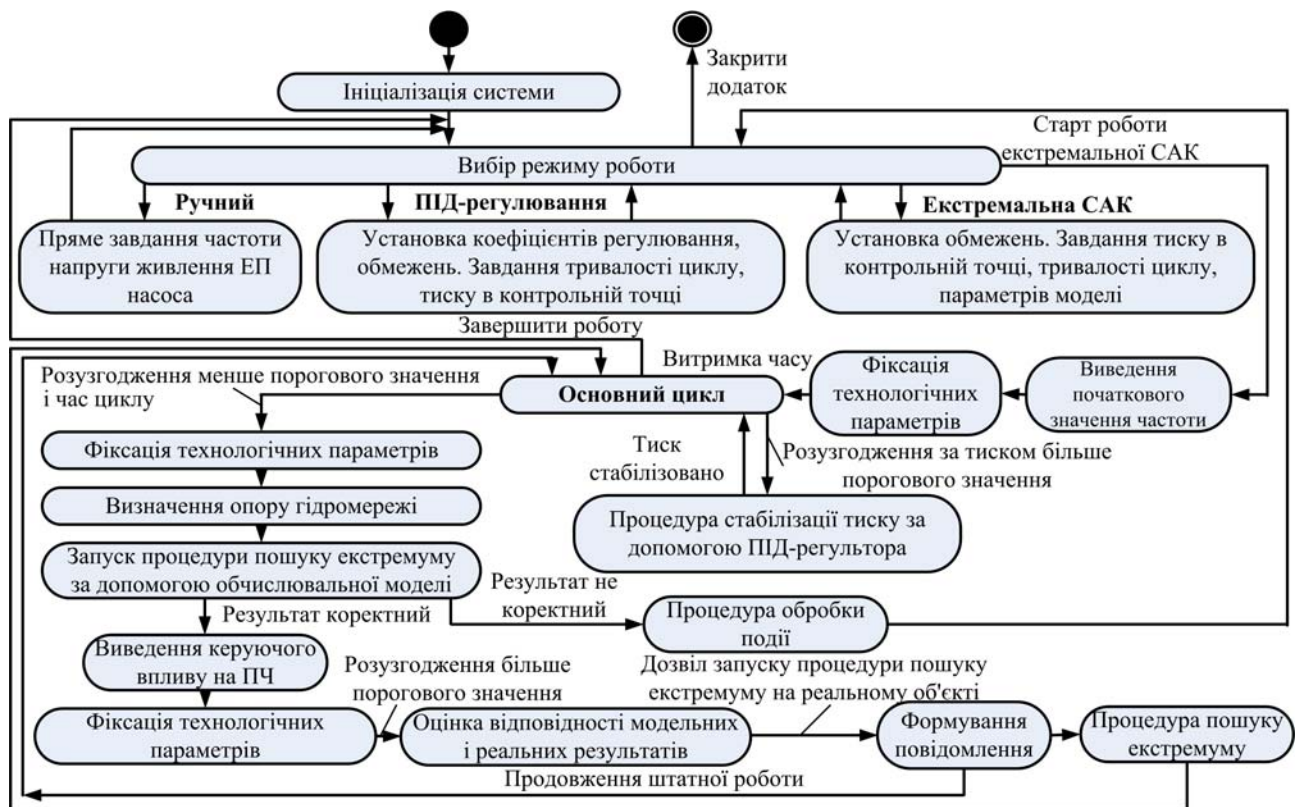


Рис. 3

Принцип роботи запропонованої екстремальної САК НК пояснюється показаними на рис. 4 графіками зміни параметрів системи: подачі  $Q(t)$ , споживаної  $P_{con}(t)$  НА потужності, частоти  $f(t)$  мережі живлення, напору  $H_{rec}(t)$  і опору  $R_{curr}(t)$  у гідромережі споживача. У момент часу  $t_1=500$  с зменшується водоспоживання, при цьому система спочатку стабілізує напір у контрольній точці гідромережі ( $t_{2,3}=600-650$  с), а потім здійснює пошук частоти обертання ЕП насоса ( $t_4=650$  с), що відповідає режиму НК із максимальною ефективністю ( $t_5=900$  с).

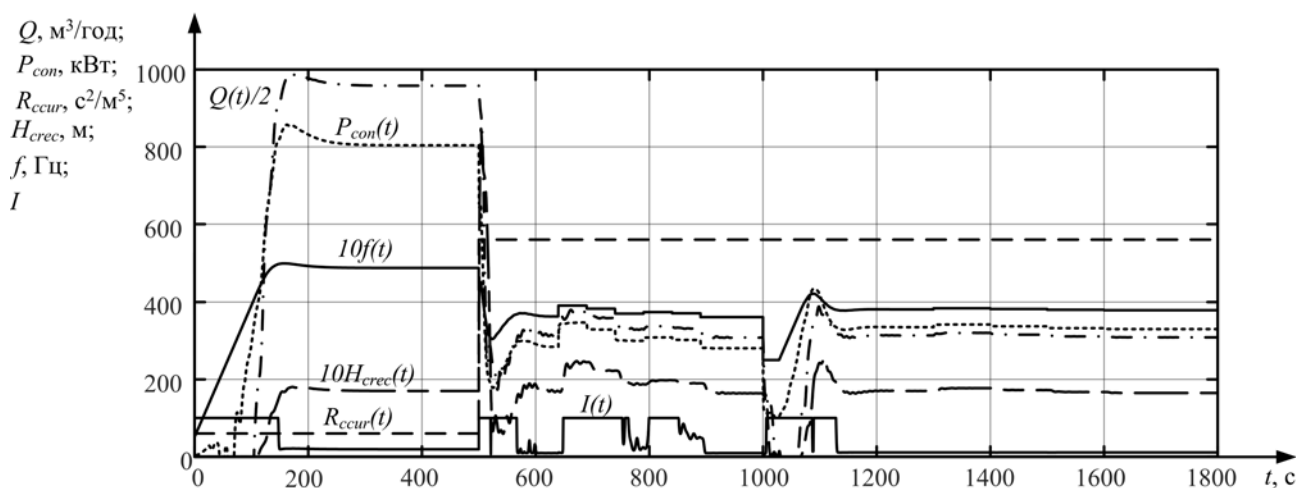


Рис. 4

Зміна  $H-Q$  характеристик насоса в процесі експлуатації задається відповідними коефіцієнтами апроксимації  $A_2, B_2, C_2$  і математичною залежністю для визначення поточного ККД насоса [4]:  $\eta_{pi}(t) = \eta(1 - a_\eta T_y)$ , де  $T$  – тривалість експлуатації насоса;  $t_y$  – кількість годин експлуатації протягом року;  $a_\eta$  – параметр зміни ККД НА в результаті корозії та забруднення внутрішньої частини робочих коліс.

У момент часу  $t_6=1000$  с (рис. 4) відбувається зміна напірно-витратної і енергетичної характеристик насоса у результаті зношення. Аналіз отриманих кривих показав, що при експлуатації насоса протягом  $T=10$  років ( $a_\eta=1,5 \cdot 10^{-6}$ ;  $t_y=4344$  год) енергоспоживання НА зросло на 18 %, при  $T=30$  років – на 35 %.

Підтвердження ефективності роботи екстремальної САК НК виконано шляхом порівняння з кривими, отриманими у разі роботи системи стабілізації тиску на базі ПІД-регулятора (рис. 5), де напір підтримується на рівні  $H_{rec}=17$  м, а подача в мережі споживача змінюється за графіком водоспоживання, який відповідає двом ступеням зміни витрати води споживачами. Перша ступінь відповідає максимальній витраті води, друга – мінімальній. Різницею ступенів є діапазон регулювання продуктивності, який складає 60 % нижче від номінальної.

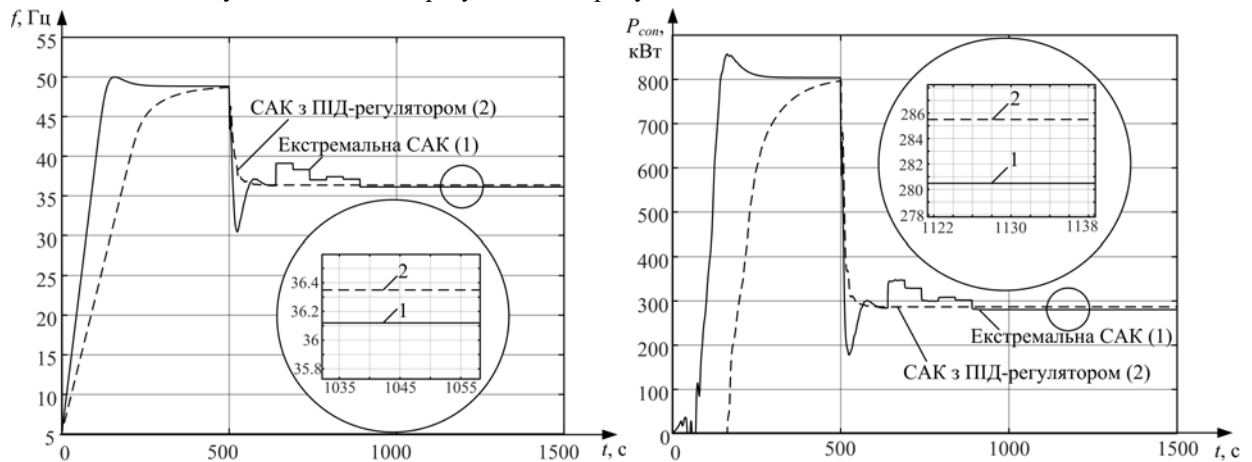


Рис. 5

Аналіз досліджень на математичній моделі при відпрацюванні реального графіка водоспоживання, який включає шість ступенів зміни витрати води, показав, що енергоспоживання екстремальної САК НК на 3 % менше в порівнянні з системою стабілізації тиску на базі ПІД-регулятора та відповідає річній економії електроенергії, що дорівнює 105 МВт. Слід зазначити, що вартість запропонованої екстремальної САК НК та системи стабілізації тиску на базі ПІД-регулятора однакова. Відмінності у технічній реалізації полягають лише у програмному модулі, який у першому випадку реалізує алгоритм пошуку екстремуму показника ефективності, у другому – стабілізує тиск у контрольній точці трубопровідної мережі.

**Висновки.** Доведено, що для отримання максимальної ефективності при розробці систем автоматичного керування насосним комплексом критерій оптимальності повинен включати три компоненти: технологічну, енергетичну і ресурсну складові. Це дає змогу забезпечити стабілізацію технологічного параметра відповідно до необхідного водоспоживання, а також здійснити мінімізацію споживаної електроенергії і знизити витрати ресурсу електрогідравлічного обладнання. Запропонована екстремальна система керування насосним комплексом у порівнянні з системою стабілізації тиску в контрольній точці трубопровідної мережі на базі ПІД-регулятора дає змогу знизити енергоспоживання на 3 %, а витрати ресурсу – на 3,5 %.

1. Бур'ян С.О., Печеник М.В., Боднар Д.О. Оптимальне керування насосною установкою з варіацією параметрів гідравлічної мережі. *Вісник НТУ ХПІ*. 2015. № 12 (1121). С. 54–59.

2. Кіселичник О.І. Дослідження екстремальної енергозберігаючої нейронної системи автоматичного керування насосом водопостачання. *Вісник КДПУ*. 2003. Вип. 2 (19). Т. 1. С. 78–82.

3. Сотник М.І., Бойко В.С., Юрченко М.М. Визначення ефективності експлуатації електромеханічних агрегатів. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. 2013. Вип. 2/2013 (22). Част. 2. С. 81–89.

4. Ткачук О.А., Ткачук А.О. Основні типи змін робочих характеристик насосних агрегатів водопровідних насосних станцій. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2006. Вип. 7. С. 43–50.

5. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 2. Issue 2 (74). Pp. 35–40.

DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.38963> .

6. Stavale, Anthony E. (2008). Reducing Reliability Incidents And Improving Meantime Between Repair. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/163924> .

7. Zagirnyak M., Korenkova T., Aliksieieva I. Energy and resource saving control system for pumping station. *Przegląd Elektrotechniczny*. Vol 2013. No 2b. Pp. 76-80.

8. Zagirnyak M., Kovalchuk V., Korenkova T. Power Model of an Electrohydraulic Complex with Periodic Nonlinear Processes in the Pipeline Network. *Intern. Conf. on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, Tatranská Lomnica, Slovakia. September 21–23, 2015. Pp. 345–352.

9. Zagirnyak M., Kravets O., Korenkova T. The optimal control of dynamic loads in a pump complex with adjustable pipeline valves. *Науковий Вісник Національного гірничого університету*. 2016. № 3 (153). С. 78-86.

10. Zagirnyak M., Rodkin D., Korenkova T. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical review)*, 2011. No 12b. Pp. 208 – 212.

**ЭКСТРЕМАЛЬНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМ КОМПЛЕКСОМ  
ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ**

**М.В. Загирняк**, академик АПН Украины, **Ю.А. Алексеева**, **И.С. Конох**, канд.техн.наук,  
**Т.В. Коренькова**, канд.техн.наук

**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского**,  
ул. Першотравневая, 20, Кременчуг, 39600, Украина, e-mail: [aljualeks@gmail.com](mailto:aljualeks@gmail.com)

*Предложен критерий максимальной эффективности экстремальной системы автоматического управления насосным комплексом, учитывающий требования технологического процесса, удельное энергопотребление и расход ресурса электрогидравлического оборудования. Обоснован выбор весовых коэффициентов критерия оптимальности. Разработана структурная схема модели экстремальной системы управления насосным комплексом шагового типа с поисковым алгоритмом. Выполнен анализ энергоэффективности предложенной системы с системой стабилизации давления в контрольной точке трубопроводной сети на базе ПИД-регулятора. Проведена оценка влияния длительности эксплуатации насоса на энергетические характеристики работы насосного комплекса. Библ. 10, рис. 5.*

**Ключевые слова:** насосный комплекс, экстремальная система управления, максимальная эффективность.

**EXTREME CONTROL SYSTEM FOR PUMP COMPLEX BY THE CRITERION OF  
MAXIMUM EFFICIENCY**

**M. Zagirnyak**, **I. Aliksieieva**, **I. Konoh**, **T. Korenkova**  
**Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University**,

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine, e-mail: [aljualeks@gmail.com](mailto:aljualeks@gmail.com)

*The criterion of maximum efficiency of extreme automatic control system for pumping complex, which takes into account the requirements of the technological process, specific energy consumption and resource consumption of electrohydraulic equipment, are proposed. The choice of the weight coefficients of the optimality criterion is justified. A structural diagram of the model of an extreme control system for pumping complex of step type with a search algorithm is developed. The energy efficiency of proposed system is analyzed with a pressure stabilization system at the control point of a pipeline network based on a PID controller. The effect of the duration pump operation on the energy characteristics of the pump complex was estimated. References 10, figures 5.*

**Key words:** pumping complex, extreme control system, maximum efficiency.

1. Buryan S.O., Pechenyk M.V., Bodnar D.O. An optimal management the pumping setting is with variation of parameters of hydraulic network. *Visnyk NTU KhPI*. 2015. No 12 (1121). Pp. 54–59. (Ukr)
2. Kiselychnyk O.I. Investigation of the extreme energy saving neural system of the automatic control of the water supply pump. *Visnyk KDPU*. 2003. Vyp. 2 (19). Vol. 1. Pp. 78–82. (Ukr)
3. Sotnyk M.I., Boyko V.S., Yurchenko M.M. Determination of the efficiency of operation of electromechanical aggregates. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*. 2013. Vyp. 2/2013 (22). Vol. 2. Pp. 81–89. (Ukr)
4. Tkachuk O.A., Tkachuk A.O. The main types of changes operating curves of pumping units of water supply pumping stations. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky*. 2006. Vyp 7. Pp. 43–50. (Ukr)
5. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 2. Issue 2 (74). Pp. 35–40. Doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.38963> .
6. Stavale, Anthony E. (2008). Reducing Reliability Incidents And Improving Meantime Between Repair. Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/163924> .
7. Zagirnyak M., Korenkova T., Aliksieieva I. Energy and resource saving control system for pumping station. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2013. Vol 2013. No 2b. Pp. 76-80.
8. Zagirnyak M., Kovalchuk V. and Korenkova T. Power Model of an Electrohydraulic Complex with Periodic Nonlinear Processes in the Pipeline Network. Intern. Conf. *on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)*, Tatranská Lomnica, Slovakia. September 21–23, 2015. Pp. 345–352.
9. Zagirnyak M., Kravets O., Korenkova T. The optimal control of dynamic loads in a pump complex with adjustable pipeline valves. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*. 2016. No 3 (153). Pp. 78-86.
10. Zagirnyak M., Rodkin D. and Korenkova T. Enhancement of instantaneous power method in the problems of estimation of electromechanical complexes power controllability. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical review)*. 2011. No 12b. Pp. 208–212.

Надійшла 02.03.2018  
Остаточний варіант 25.06.2018