

ДВОКАНАЛЬНА ЕКСТРЕМАЛЬНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ УСТАНОВКОЮ

Вступ. У сучасних умовах все більш актуальним стає питання розробки та впровадження енергоощадливих та енергоефективних технологій. Особливо це стосується широко розповсюджених високопотужних систем водопостачання. На сьогодні, всі сучасні методи енергоефективного керування насосами водопостачання ґрунтуються на використанні частотно-керованих асинхронних електроприводів. На практиці широке розповсюдження знаходять системи стабілізації напору та програмне керування насосами на основі графіків (прогнозів) добового водоспоживання [1]. Найкращі результати досягаються при максимально можливому зменшенні швидкості, яке допустиме для конкретного режиму водоспоживання, та забезпеченні продуктивності насоса, яка відповідає потребам споживачів. Так насос Magna фірми Grundfos [2] забезпечує робочу точку насосу на найнижчій можливій напірній характеристиці для певного режиму. Так звані "інтерактивні" алгоритми керування забезпечують автоматичний пошук мінімально-достатньої швидкості насосу, яка задовольняє потреби споживачів [3]. Розглянуті вище способи забезпечують певний рівень енергозбереження, але оскільки робоча точка не завжди опиняється на лінії максимального ККД при використанні вищерозглянутих алгоритмів керування, енергоефективність системи може знижуватися. Ця задача розв'язується за допомогою екстремальної системи керування ККД насосної установки [4]. Значна увага також приділяється втратам у привідному асинхронному двигуні. Екстремальні алгоритми забезпечують зменшення сумарних втрат до мінімально-можливого значення шляхом зниження напруги статора [5]. Поєднання двох останніх алгоритмів може суттєво підвищити енергоефективність системи водопостачання в цілому та забезпечити певний рівень енергозбереження.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення енергоефективності насосної установки на основі мінімізації втрат у привідному асинхронному двигуні та екстремального керування ККД шляхом розробки двоканальної електромеханічної системи автоматичного керування. Працездатність системи перевіряється шляхом математичного моделювання.

Екстремальний регулятор сумарних втрат. Сумарні втрати енергії в асинхронних електродвигунах мають магнітну, електричну та механічну складові [5]

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ст}} + P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} = P_{\text{ст.н}} \left(a \frac{U^2}{U_{\text{н}}^2} \frac{f_{\text{н}}}{f} + b \frac{U^2}{U_{\text{н}}^2} \right) + P_{\text{м.н}} \left(\frac{M_{\text{с}}}{M_{\text{н}}} \right)^2 \left(\frac{U_{\text{н}}}{U} \right)^2 \left(\frac{f}{f_{\text{н}}} \right)^2 + P_{\text{мех.н}} \frac{1-s}{1-s_{\text{н}}} \frac{f}{f_{\text{н}}} \quad (1)$$

де $P_{\text{ст.н}}$, $P_{\text{м.н}}$, $P_{\text{мех.н}}$ – втрати в номінальному режимі в сталі, міді та механічні; $U_{\text{н}}$, $M_{\text{н}}$, $f_{\text{н}}$, $s_{\text{н}}$ – номінальні напруга статора, момент, частота та ковзання двигуна;

Застосування екстремального регулятора базується на тому, що функція $P_{\Sigma}(U)$ має екстремум, а друга похідна цього виразу більша за нуль.

Алгоритм роботи екстремального регулятора:

- в момент часу $t=0$ регулятор подає сигнал $U_{\text{с}}$, який встановлює номінальну напругу на статорі двигуна;
- через проміжок часу Δt , необхідний для закінчення перехідного процесу у електромеханічній системі вимірюються та запам'ятовуються сумарні витрати $P_{\Sigma 1}$;
- робиться перший пробний крок в бік зменшення напруги на виході перетворювача частоти і через час Δt вимірюються втрати $P_{\Sigma 2}$, які відповідають напрузі $U_{\text{н}} - \Delta U$;
- визначається різниця $\Delta P = P_{\Sigma 1} - P_{\Sigma 2}$;
- якщо $\Delta P > 0$, то робиться наступний крок у тому ж напрямку, і так доти, поки різниця $P_{\Sigma i} - P_{\Sigma(i+1)}$ не стане від'ємною;
- при $P_{\Sigma i} - P_{\Sigma(i+1)} < 0$ наступний крок робиться в бік збільшення напруги перетворювача частоти.

Під час роботи у системі встановлюються коливання із невеликою сталою амплітудою поблизу точки екстремуму. Результати досліджень екстремального регулятора сумарних втрат для показані у [5].

Алгоритм екстремального керування ККД насосної установки. Для одного насосу алгоритм представлений у [6]. Нехай насос працює на довільній швидкісній характеристиці ω_1 в робочій точці А (рис.1) з характеристикою гідравлічної мережі 1, причому робоча точка розташована зліва від лінії максимального ККД η_{max} . Для переходу на цю лінію за умови задоволення потреб споживачів (продуктивність Q_A) необхідно змусити останніх змістити робочу точку. Для цього система керування зменшує швидкість двигуна на деяке фіксоване значення і насос переходить на нову швидкісну характеристику ω_2 у робочу точку В з продуктивністю Q_B . З метою стабілізації продуктивності споживачі змушені зменшити гідравлічний опір мережі до значення, при якому характеристика мережі прийме вигляд 2. Таким чином, робоча точка переходить у точку С з продуктивністю Q_C .

На наступному кроці система керування знову зменшить оберти насосу на фіксоване значення (характеристика ω_3 , робоча точка D). Такий процес відбуватиметься доти, поки робоча точка насосу не виявиться праворуч кривої максимального ККД (швидкісна характеристика ω_6 , робоча точка K, характеристика мережі 6). Після цього система фіксує збільшити оберти насосу, що призведе до збільшення продуктивності та необхідності споживачам прикривати крани. В результаті робота насоса характеризуватиметься циклічною послідовністю наступних робочих точок A-B-C-D-E-F-G-Y-I-J-K-L. Оскільки ККД насоса однозначно визначається швидкістю та продуктивністю, то в результаті роботи алгоритму ККД насоса коливатиметься в околі максимального значення. Якщо споживачі не реагують на зміну швидкості (не змінюють величину гідравлічного опору), то вона буде зменшуватися до мінімально-дозволеного значення. У випадку відсутності обмеження витрати можуть спасти до нуля.

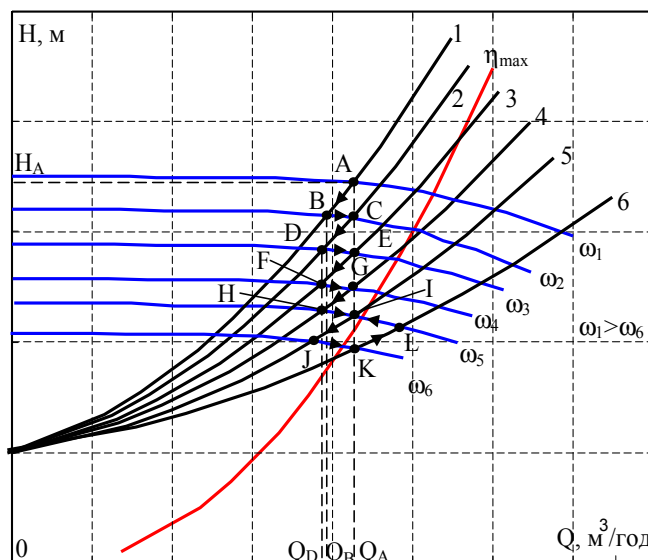


Рис. 1. Алгоритм роботи екстремального регулятора ККД насосу

Екстремальний алгоритм для двох послідовно з'єднаних насосів представлений у [4].

Структурна схема двоканальної екстремальної електро механічної системи автоматичного керування насосною установкою. Загальний вигляд структурної схеми зображений на рис.2.

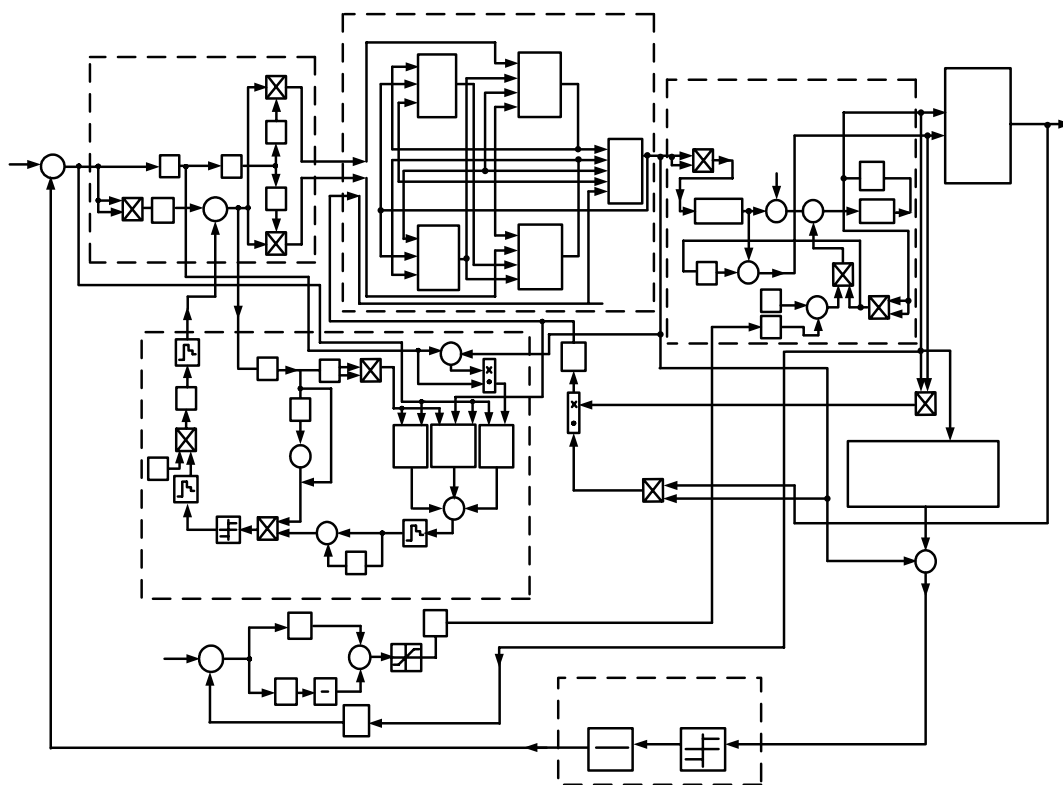


Рис.2. Структурна схема двоканальної екстремальної системи автоматичного керування насосною установкою

Математична модель насосної установки згідно [7] описується системою рівнянь

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{H_{0H}}{\chi \omega_H^2} \omega^2 - \frac{H_{ст}}{\chi} - \frac{1}{\chi} (a_H + a) Q^2, \quad (2)$$

$$H = \frac{H_{0H}}{\omega_H^2} \omega^2 - a_H Q^2, \quad (3)$$

$$M_c = \frac{\rho g Q H}{\eta \omega}, \quad (4)$$

де Q - продуктивність насосу; H_{0H} - напір при нульовій подачі при номінальній швидкості; ω - швидкість обертання насосу; ω_H - номінальна швидкість обертання насосу; χ - стала часу інтегрування насосу; H_{CT} - геодезична висота підйому води; a_H - номінальний гідравлічний опір насосу; a - гідравлічний опір мережі; H - напір насосу; M_c - момент навантаження на валу двигуна; ρ - густина води; g - прискорення вільного падіння; η - ККД насосу; t - час.

Наявність зворотного клапану на виході насосу враховується наступним чином: якщо продуктивність насоса стає від'ємною, то вона приймається рівною нулю.

ККД насосу є нелінійною функцією, яка залежить від положень робочих точок на напірних характеристиках $\eta_i = f(Q_i, H_i)$. В даній роботі ці залежності апроксимуються тришаровою нейронною мережею типу «feed-forward backpropagation» з 10, 10, 1 нейронами та функціями активації $\tanh$, $\tanh$, purelin у відповідних шарах [4]. Для навчання нейронних мереж використана база даних 3964 робочих точок з каталогу виробника [8].

Крива максимального ККД насоса також апроксимована аналогічною нейронною мережею, навченою на основі даних 264 робочих точок.

Привідні асинхронні двигуни насосів описуються нелінійними двофазними моделями в нерухомій системі координат статора a-b [9]. Перетворювач частоти реалізує квадратичний закон керування $u/f^2 = \text{const}$ [4].

Екстремальний регулятор працює у дискретні моменти часу T_0 . Він представляє собою послідовне з'єднання ланки виділення знаку різниці між фактичною швидкістю керованого насоса та бажаним її значенням, яке забезпечує максимально можливий ККД при поточній величині його продуктивності, та дискретного інтегратора, який визначає амплітуду зміни швидкості [4]. Екстраполятор нульового порядку фіксує необхідну величину зменшення завдання частоти Δf протягом періоду квантування.

Дослідження двоканальної екстремальної системи. Для дослідження вибраний насос фірми Vogel Pumpen CNX-100-65-400 [8] 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 привідного асинхронного двигуна 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 $H_{CT} = 100$ м, $\chi = 0.5$ с/(м²/год), приведений момент інерції на валу двигуна $J = 1.4$ кг м². Розрахункові параметри насоса на основі напірних характеристик є наступними: $H_0 = 235$ м, $a_H = 20000$ м/(м³/с)².

Результати досліджень двоканальної екстремальної системи керування представлені на рис. 3-5.

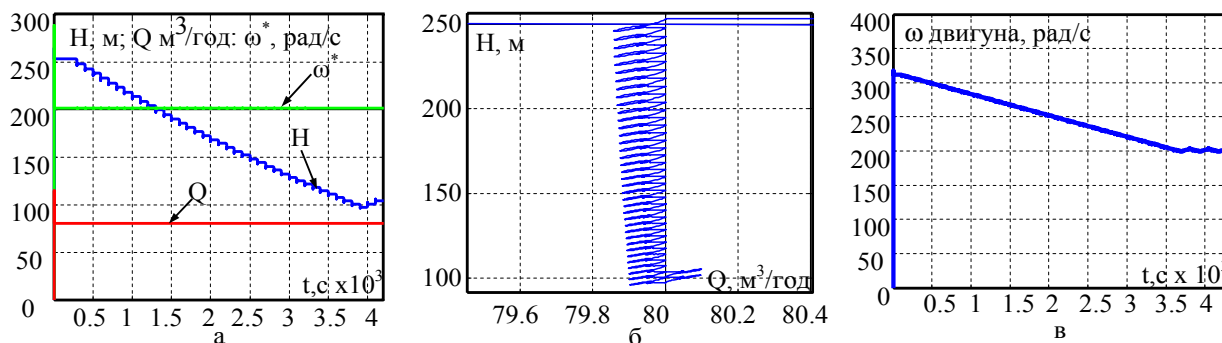


Рис.3: а – графіки перехідних процесів напору H , подачі Q та оцінюючої швидкості ω^* ; б – Q - H -характеристика; в – графік перехідного процесу швидкості двигуна ω

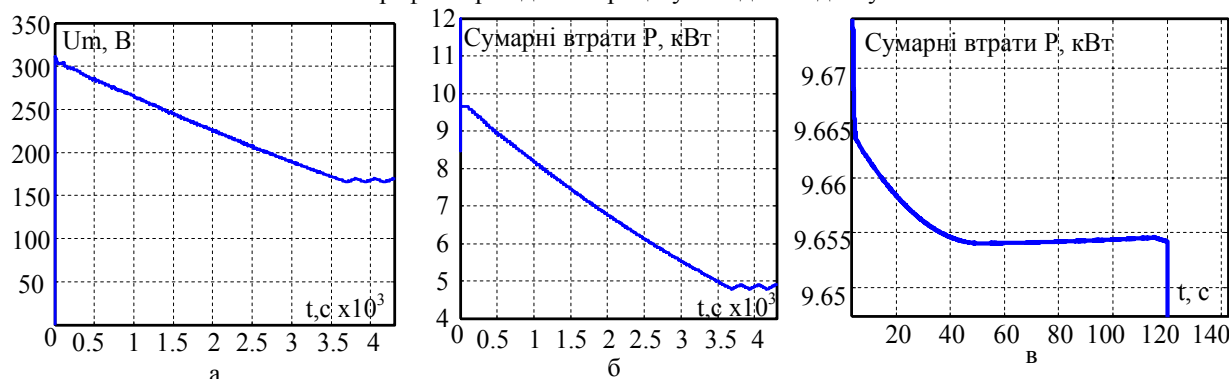


Рис.4: а- графік перехідного процесу напруги U_m ; б – графік перехідного процесу моменту двигуна M ; в – графік зміни сумарних втрат двигуна для одного такту квантування екстремального регулятора ККД насоса

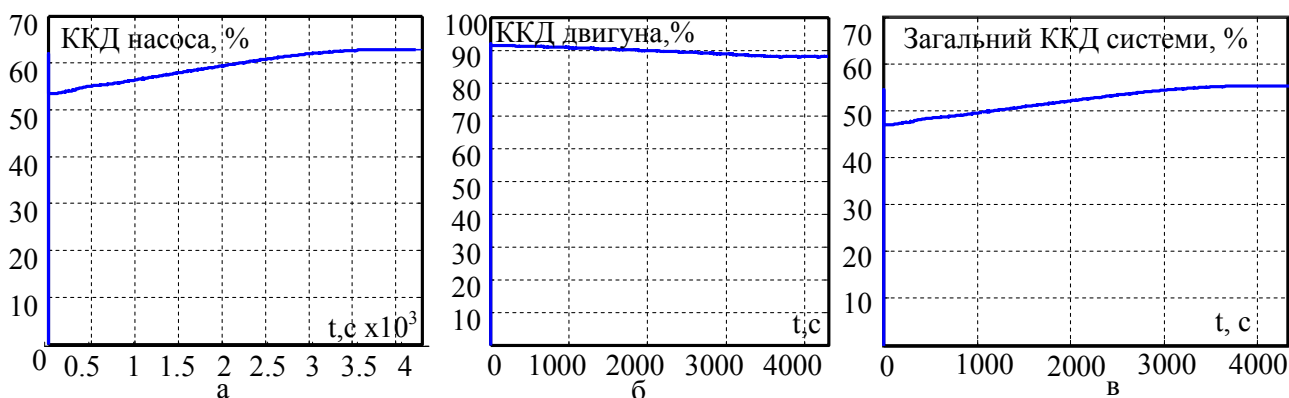


Рис.5: а – графік перехідного процесу ККД насоса ; б – графік перехідного процесу ККД двигуна; в – графік перехідного процесу загального ККД системи

Система має два канали регулювання: за напругою живлення з екстремальним регулятором сумарних втрат двигуна та за частотою з екстремальним регулятором ККД насоса. При моделюванні прийнято період квантування каналу регулювання ККД насоса – 100 с., сумарних втрат – 2 с. Вихідна робоча точка насоса знаходилася ліворуч від кривої максимального ККД. Поведінка споживачів моделювалася як система стабілізації продуктивності з ПІ-регулятором. Результати досліджень показали, що після деякого часу швидкість насоса коливається навколо заданого значення (рис. 4, в), а його ККД коливається навколо максимального (рис. 5, а). Траєкторія руху робочої точки відповідає вищеприписаному екстремальному алгоритму (рис. 4, б). На кожному такті квантування каналу регулювання частоти відбувається мінімізація сумарних втрат в двигуні (рис. 4, в). ККД двигуна залишається майже сталим (рис. 5, б). Загальний ККД системи збільшується на 6%, що підвищує енергоефективність двоканальної системи. За рахунок роботи екстремального регулятора сумарних втрат, а також за рахунок зменшення частоти у системі зменшуються сумарні втрати на 5 кВт (3% від номінальної потужності), що показано на рис. 4, б.

Висновки. Розглянута двоканальна екстремальна електромеханічна система керування насосами водопостачання яка забезпечує підвищення енергоефективності системи в цілому та зниженню втрат потужності в привідному двигуні. Досліди показали, що для забезпечення роботи алгоритму вихідна робоча точка насоса повинна знаходитися зліва від лінії максимального ККД, тобто у допустимій робочій зоні насоса, що робить його універсальним для будь-яких сфер використання насосних установок. Діапазон регулювання залежить від геодезичної висоти підйому та гідравлічного опору мережі. Величина зменшених сумарних втрат за кожен такт квантування регулятора ККД зворотно-пропорційно залежить від величини моменту навантаження. Можливі подальші дослідження з метою застосування двоканального екстремального регулювання у багатоагрегатних насосних установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kiselychuk O., Bodson M., Werner H. Overview of energy efficient control solutions for water supply systems // Transactions of Kremenchuk State Polytechnic Univ. Kremenchuk: KSPU, N3/2009 (56), part 1, 2009. pp.40-45.
2. Smart Circulators. The new generation of intelligent pumps. [http://www.grundfoss.com/web/HomeUs.nsf/GrafikOpslag/Article_Misc/\\$File/smartCirculators.pdf](http://www.grundfoss.com/web/HomeUs.nsf/GrafikOpslag/Article_Misc/$File/smartCirculators.pdf)
3. Попович М.Г., Кіселичник О.І., Бур'ян С.О., Соколовський О.Ф./ Експериментальні дослідження роботи інтерактивного енергозберігаючого контролера на гібридній моделі насосної установки// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2007 (44). Частина 1. С.72-75.
4. Popovich M., Kiselychuk O., Buryan S. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series // Transactions of Kremenchuk State University. Kremenchuk: KSU, N3/2010 (62), part 2, 2010. pp.37-41.
5. Попович М.Г., Печеник М.В., Ковальчук О.В., Кіселичник О.І. «Екстремальні енергозберігаючі електромеханічні системи з асинхронним електроприводом»// Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірка наукових праць. Тематичний випуск 10. –Харків, НТУ ХПІ, 2001. с.314-318.
6. Попович М.Г., Печеник М.В., Кіселичник О.І. Енергозбереження в системах водопостачання при екстремальному керуванні насосними установками// Технічна електродинаміка, Теорія і практика енергозбереження. Київ, 2003. с.52-55.
7. Kiselychuk O., Bodson M., Werner H. Interactive energy saving control of water supply pump based on pressure measurement // Transactions of Kremenchuk State Polytechnic University. Kremenchuk: KSPU, N3/2009 (56), part 1, 2009. pp.166-171.
8. ITT Industries. Vogel Select CD// Selection Program Jan. 2009.
9. 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.