

М. Я. Островерхов, д. т. н., проф.; М. П. Бурик

ОПТИМАЛЬНА ЗА КРИТЕРІЄМ МІНІМУМУ ЕНЕРГІЇ ПРИСКОРЕННЯ СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ НАПОРУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСУ

Запропоновано метод оптимізації процесу керування напором гідравлічної мережі на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій, що дозволяє отримати бажану динамічну точність відпрацювання заданої траєкторії в умовах дії параметричних і координатних збурень.

Ключові слова: оптимізація, асинхронний електропривід, система регулювання напором, відцентровий насос.

Вступ

Застосування частотно регульованого електроприводу для побудови систем автоматичного керування насосними установками є економічно доцільним. Використання плавного регулювання координат насосних агрегатів, крім економії енергії, забезпечує зменшення гідравлічних ударів та перенапружень у трубопроводі, збільшення терміну експлуатації насосів та елементів гідравлічної мережі [1]. Високих динамічних показників системи регулювання координат електроприводу досягають за рахунок використання векторного керування. У якості двигунів більшості електроприводів насосів використовують надійні асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором (АД). Проте, з погляду керування, вони є нелінійними та взаємозв'язаними об'єктами, що ускладнює процес якісного регулювання координат системи.

Для підвищення якості керування напором відцентрового насосу для забезпечення задовільних енергетичних показників запропоновано метод на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій та спостерігач польової компоненти струму статора АД. У результаті розроблено алгоритми керування оптимальною системою регулювання напором відцентрового насосу, що забезпечують слабку чутливість до дії на двигун, насос та гідравлічну мережу параметричних та координатних збурень [2].

Метою роботи є дослідження системи непрямого векторного керування напором відцентрового насосу з оптимізованими за критерієм мінімуму енергії прискорення законами регулювання в умовах дії параметричного збурення, зумовленого варіацією активного електричного опору обмотки ротора приводного АД.

Результати дослідження

Система непрямого векторного керування напором гідравлічної мережі містить відцентровий насос, АД, перетворювач частоти та датчики напорів і струмів трьох фаз двигуна. Динамічні характеристики ділянки гідравлічної мережі під час регулювання напором записують за допомогою диференціального рівняння [3]:

$$\frac{T_Q}{2Q_n(a_p + a_l)} \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = \frac{(1-\beta)T_Q}{2Q_n(a_p + a_l)} \frac{2H_0}{\omega_n} \frac{d\Delta\omega}{dt} + \frac{(1-\alpha)a_l}{(a_p + a_l)} \frac{2H_0}{\omega_n} \Delta\omega, \quad (1)$$

де T_Q – коефіцієнт математичної моделі; Q_n – номінальне значення подачі за номінальної кутової швидкості насосу в робочій точці; H – напір насосу; a_p – гідравлічний опір насосу; a_l – коефіцієнт опору гідравлічної мережі; H_0 – напір насосу ($Q=0$) за номінальної кутової

швидкості; ω – кутова швидкість насосу; ω_n – номінальна кутова швидкість.

Відцентровий насос працює в системі з протитиском. Диференційні рівняння (2) описують еквівалентну двофазну модель приводного АД у синхронній системі координат ($d - q$) під час стандартних допущень:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dH}{dt} + \frac{2Q_n(a_p + a_l)}{T_Q} H &= 2 \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left(|\psi_2^*| i_{1q} \right) \right] + V_H; \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} [T - T_l] = \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left(|\psi_2^*| i_{1q} \right) \right] - \left[T_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + (T_n - T_0) \frac{\omega}{\omega_n} \sqrt{\frac{H_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} - H_{st}}{H_0 - H_{st}}} \right] \frac{1}{J}; \\ \frac{di_{1d}}{dt} + \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m \right) i_{1d} &= V_{1d} + \frac{u_{1d}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} + \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m \right) i_{1q} &= V_{1q} + \frac{u_{1q}}{\sigma}; \\ \frac{d|\psi_2^*|}{dt} + \alpha |\psi_2^*| &= \alpha L_m i_{1d}^*; \end{aligned} \right.$$

$$V_H = 2 \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} T_l + \frac{2Q_n a_l}{T_Q} \frac{2H_0}{\omega_n} \omega \leq V_H^0, V_{1d} = \omega_0 i_{1q} + \alpha \beta |\psi_2^*| \leq V_{1d}^0, V_{1q} = -\omega_0 i_{1d} - \omega \beta |\psi_2^*| \leq V_{1q}^0; \quad (2)$$

$$2 \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} \left(|\psi_2^*| i_{1q} \right) \right] > V_H^0, \frac{u_{1d}}{\sigma} > V_{1d}^0, \frac{u_{1q}}{\sigma} > V_{1q}^0,$$

де $\alpha=R_2/L_2$, $\sigma=L_1-L_m^2/L_2$, $\beta=L_m/\sigma L_2$ – коефіцієнти математичної моделі; R_1, R_2 – активний опір обмотки статора та ротора; L_1, L_2, L_m – індуктивність обмотки статора, ротора та контура намагнічування; u_{1d}, u_{1q} – компоненти вектора напруги статора; i_{1d}, i_{1q} – компоненти вектора струму статора; $|\psi_2^*|$ – заданий модуль вектора потокозчеплення ротора; J – сумарний момент інерції електропривода; $p_n=1$ – число пар полюсів; T_l – момент навантаження; T_o – момент на валу насоса за номінальної кутової швидкості та $Q=0$; T_n – номінальний момент відцентрового насосу; H_{st} – статичний напір під час підйому рідини на потрібну висоту; V_H, V_{1d}, V_{1q} – координатні збурення, які виникають унаслідок взаємного впливу та є невизначеними й обмеженими за величиною.

Задані траєкторії зміни напору гідравлічної системи $H^*(t)$ та модуля потокозчеплення ротора $|\psi_2^*|$ мають обмежену першу та другу похідні за часом. Алгоритми керування потокозчепленням ротора, компонентами струму статора по осям d та q та напором відцентрового насосу забезпечують астатизм першого порядку за керівною дією та мають таку структуру:

– регулятор модуля потокозчеплення ротора $|\psi_2^*|$ (РП)

$$i_{1d}^* = \frac{|\psi_2^*|}{Lm} + \frac{d|\psi_2^*|}{dt} \frac{1}{\alpha Lm},$$

$$|\psi_2^*| = |\psi_2^*(0)| + (|\psi_{2n}^*| - |\psi_2^*(0)|) \sqrt{\frac{H^*}{H_n}}, \quad (3)$$

$$|\psi_2^*| > 0, |\psi_2^*(0)| = 0.02 \text{ Вб}, |\psi_{2n}^*| = 0.92 \text{ Вб};$$

– регулятор напору відцентрового насосу (РН)

$$i_{1q}^* = k_H (\gamma_H \int (H^* - H) dt - H); \quad (4)$$

– регулятори компонент струму статора i_i по осі d та q (PC_d та PC_q)

$$\begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{i1d} (\gamma_{i1d} \int (i_{1d}^* - i_{1d}) dt - i_{1d}) \\ k_{i1q} (\gamma_{i1q} \int (i_{1q}^* - i_{1q}) dt - i_{1q}) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

– спостерігач польової компоненти струму статора i_{ld} (СП)

$$\dot{i}_{ld}^{\wedge} = -\left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m\right) i_{ld}^{\wedge} + \omega_0 i_{1q} + \alpha\beta |\psi_2^*| + \frac{u_{1d}}{\sigma},$$

$$\frac{d\varepsilon_0}{dt} = \omega_0 = \omega + \frac{\alpha L m i_{1q}}{|\psi_2^*|} + k_o (\gamma_o \int (i_{ld} - i_{ld}^{\wedge}) dt - i_{ld}^{\wedge}); \quad (6)$$

$$\varepsilon_0(0) = 0,$$

де $\varepsilon_0(0)=0$ — кутове положення рухомої системи координат (d - q) відносно нерухомої системи координат (a - b); ω_0 — кутова швидкість магнітного поля; $k>0$ — коефіцієнт підсилення регуляторів; $\gamma \approx (3/t_{mn}) > 0$ — коефіцієнт, що задає бажану тривалість перехідного процесу аперіодичного характеру.

Дослідження динамічних показників представленої системи непрямого векторного керування напором відцентрового насосу проведено шляхом математичного моделювання під час дії параметричного збурення (зменшення на 40 % активного електричного опору обмотки ротора R_2).

АД типу 4A90L2Y3 має такі параметри: $P_n=3$ кВт, $\omega_n=300,65$ рад/с, $U_{1n}=380$ В, $f_{1n}=50$ Гц — номінальна потужність, кутова швидкість, лінійна напруга та частота напруги; $R_1=2,535$ Ом, $R_2=1,628$ Ом — активний опір статора та ротора; $L_1=0,394$ Гн, $L_2=0,398$ Гн — індуктивність статора і ротора; $L_m=0,387$ Гн — індуктивність намагнічувального контура; $J=0,007$ кгм² — момент інерції установки; $T_I=10$ Нм — момент навантаження.

Гідравлічна мережа має довжину 100 м. Рідина (вода) підіймається на висоту $H_{st}=65,5$ м. Використовується відцентровий насос типу NMD 25/190В/А, що забезпечує подачу рідини $Q_n=4,5$ м³/г та має повний напір $H=71$ м.

Параметри запропонованих алгоритмів керування такі: коефіцієнти регуляторів компонент вектора струму статора PC_d та PC_q $\gamma_{i1q}=\gamma_{i1d}=800$, $k_{i1q}=k_{i1d}=50$; коефіцієнти регулятора напору РН $\gamma_H=100$, $k_H=1$; коефіцієнти спостерігача потокозчеплення СП $\gamma_o=50$, $k_o=1$. Початкові умови всіх змінних приймаємо нульовими, крім $|\psi_2^*(0)|=0,02$ Вб.

Результати та послідовність виконання дослідження представлена на рис. 1:

1) у момент часу $t=0$ с ротор АД прискорюється до номінальної кутової швидкості по Наукові праці ВНТУ, 2018, № 1

заданій траєкторії напору за 1,5 с. У гідравлічній мережі встановлюється бажаний напір 71 м (одночасно збуджується АД від 0,2 до 0,92 Вб);

- 2) у момент часу $t=2$ с виникає різке зменшення споживання води, що спричиняє стрибок тиску $H_c=4$ м;
- 3) у момент часу $t=2,5$ с швидко збільшується споживання води, що зумовлює стрибок тиску з протилежним знаком $H_c=-4$ м.

Суцільною лінією на рис. 1 зображені графіки перехідних процесів координат електромеханічної системи за номінальних параметрів АД, а пунктирною лінією – під час дії параметричного збурення. Представлені похибки напору гідравлічної мережі в обох випадках показують, що запропонована система керування забезпечує астатичне керування напором із заданими динамічними показниками. Зменшення активного опору ротора на 40% призводить до незначної зміни показників якості відпрацювання системою завдання, а саме: збільшується динамічна похибка під час розгону АД по заданій траєкторії від 0,88 до 0,92 м за повного напору насосу 71 м. Показники якості керування за компенсації зміни витрат у системі залишаються практично однаковими. Час компенсації зменшився з 0,046 до 0,045 с, максимальне відхилення напору збільшилося з 3,997 до 3,999 м.

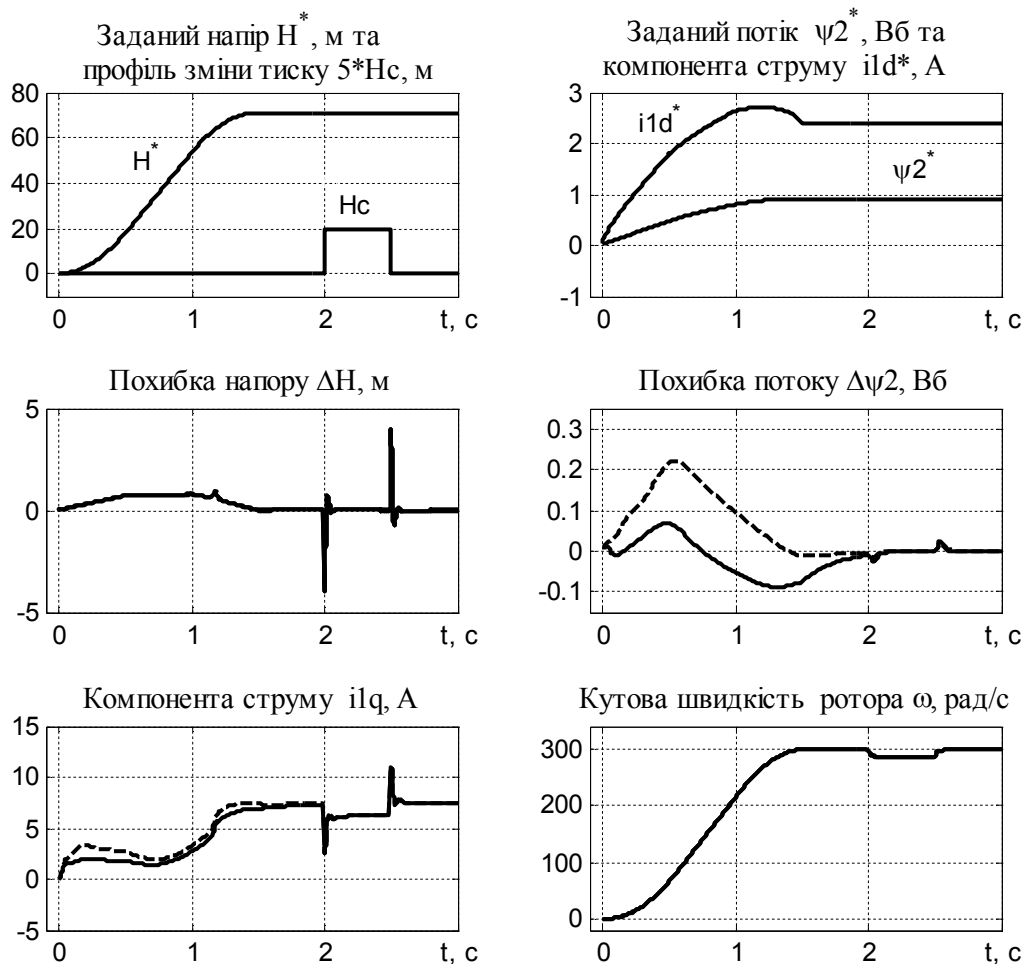


Рис. 1. Графіки заданих траєкторій та перехідних процесів координат системи керування напором відцентрового насосу

Як видно з рис. 1, у системі відсутня значна деградація перехідних процесів електромеханічних координат під час дії параметричного збурення. Під час розгону двигуна максимальне збільшення значення компоненти струму статора по осі q становить 1,4 А, а

модуля потокозчеплення ротора – 0,013 Вб (1,4% відносно заданого значення 0,92 Вб). Кутова швидкість ротора АД змінюється під час відпрацювання заданої траєкторії напору насосу та дії параметричних і координатних збурень плавно, без перерегулювання та коливання.

Висновки

Представлена оптимальна за критерієм мінімуму енергії прискорення система непрямого векторного регулювання напору відцентрового насосу забезпечує бажану якість керування у статичному та динамічному режимах під час дії дестабілізуючого фактору (зменшення активного опору обмотки статора на 40% від номінального). Система забезпечує заданий астатизм першого порядку за керівною дією та відсутність статичних похибок за напором під час зміни споживання рідини.

Простота практичної реалізації алгоритмів регулювання, що не містить операцій диференціювання, зумовлює перевагу запропонованого методу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходушных установках / Б. С. Лезнов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.
2. Островерхов М. Я. Система автоматичного регулювання напору насосної установки з властивостями слабкої чутливості до параметричних збурень електропривода / М. Я. Островерхов, М. П. Бурик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2016. – Вип. 175. – С. 128 – 130.
3. Островерхов М. Я. Енергоефективна система регулювання напору відцентрового насосу / М. Я. Островерхов, М. П. Бурик // Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2017. – Вип. 7. – Т. 1. – С. 41 – 46.

Рекомендована кафедрою теоретичної електротехніки.

Стаття надійшла до редакції 04.12.2017 р.

Стаття пройшла рецензування 11.12.2017 р.

Островерхов Микола Якович – д. т. н., професор, завідувач кафедри теоретичної електротехніки, e-mail: n.ostroverkhov@hotmail.com_

Бурик Микола Петрович – к. т. н., старший викладач кафедри теоретичної електротехніки.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».