

СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПОРУ НАСОСНОЇ УСТАНОВКИ З ВЛАСТИВОСТЯМИ СЛАБКОЇ ЧУТЛИВОСТІ ДО ПАРАМЕТРИЧНИХ ЗБУРЕНЬ

Островерхов М. Я., Бурик М. П.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

Запропоновано алгоритм керування насосною установкою з векторно-керованим асинхронним електроприводом на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії, що забезпечує високу якість керування напором в умовах дії параметричних збурень.

Постановка проблеми. Реалізація сучасних технологій в агропромисловому комплексі потребує якісного керування напором насосних установок в умовах дії різного роду дестабілізуючих факторів, зокрема: стохастична зміна параметрів гідравлічної мережі; інтенсивний знос елементів насосу і відповідне погіршення його характеристик; зміна параметрів приводного електродвигуна внаслідок нагрівання; похибки у визначенні параметрів установки за вихідними даними. Це обумовлює впровадження векторно-керованих асинхронних електроприводів з властивостями слабкої чутливості до зміни параметрів, що, як відомо, суттєво підвищує енергоефективність та зменшує споживання електроенергії насосними установками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Один з методів, який може забезпечити високу якість керування напором в умовах дії параметричних збурень, є метод на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії [1]. Переваги методу полягають в простій процедурі синтезу та реалізації алгоритмів керування. Серед відомих систем векторного керування асинхронним двигуном найбільш придатною для вирішення вказаної проблеми є система грубого векторного керування [2].

Мета статті. Пропонується розробити алгоритм керування напором насосної установки з векторно-керованим асинхронним електроприводом, який забезпечує високу якість керування та слабку чутливість до параметричних збурень.

Основні матеріали дослідження. Для досягнення вказаної мети необхідно удосконалити динамічну математичну модель гідравлічної мережі з відцентровим насосом. На рис. 1 зображена елементарна ділянка мережі регулювання напором, де: H – насос; M – електропривод; H_1 та H_2 – напір на початку та в кінці ділянки, м; K – клапан (збурення); L – повна довжина ділянки, м; L_1 – довжина мережі від початку ділянки до місця виміру напором датчиком РТ, м.

При цьому прийнято наступні допущення: ділянка представляє собою оболонку, через яку переміщується потік рідини, що не стискається; відводу та підводу тепла немає; основні властивості описуються рівнянням збереження кількості руху; датчик напором РТ знаходиться біля насосної установки $\beta=(L_1/L)\rightarrow 0$ ($L \gg L_1$); початок ділянки знаходиться близько біля місця виміру напором.

З рівняння збереження кількості руху для об'єкту з зосередженими параметрами з урахуванням вище наведених допущень отримується нелінійна

аналітичну модель ділянки мережі [3].

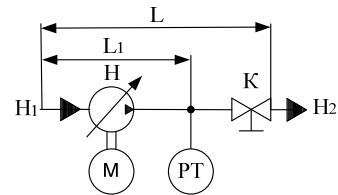


Рисунок 1 – Схема простої ділянки регулювання напором

$$\begin{cases} \frac{L}{s} \frac{d\Delta M}{dt} = \Delta P_p - \Delta P_i; \\ \Delta P_p = f(\Delta M, \Delta n); \\ \Delta P_i = f(\Delta M), \end{cases} \quad (1)$$

де s – переріз трубопроводу, м²;
 M – масова продуктивність, кг/с;
 n – частота обертання насоса, об/хв;
 ΔP_p – перепад тиску на насосі, кг/м²;
 ΔP_i – втрати тиску в трубопроводі, кг/м².

В межах робочої зони напірна (статична) характеристика відцентрового насоса $H=f(Q)$ представляється відомою залежністю

$$H = H_0 \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 - a_p Q^2, \quad (2)$$

де H_0 – напір насоса при $Q=0$ та номінальній кутовій швидкості, м;
 ω – кутова швидкість насоса, рад/с;
 ω_n – номінальна кутова швидкість, рад/с;
 a_p – гідравлічний опір насоса, с²/м⁵;
 Q – об'ємна подача, м³/с.

Статичні $H=f(Q)$ характеристики гідравлічної мережі з постійними параметрами мають вигляд

$$H = H_{st} + a_1 Q^2, \quad (3)$$

де H_{st} – статичний напір, який йде на підйом рідини на необхідну висоту (геодезичний напір), м;
 a_1 – коефіцієнт опору гідравлічної мережі, с²/м⁵.

При врахуванні $M=\rho Q$, $P=\rho g H$ та $\omega=\pi n/30$: де: ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; та лінеаризації вихідного рівняння (1)

отримується лінійна аналітична модель простої ділянки мережі за витратами у вигляді неоднорідного диференціального рівняння

$$T_Q \frac{d\Delta Q}{dt} = \frac{2H_0}{\omega_n} \Delta \omega - 2Q_n \Delta Q a_p - 2Q_n \Delta Q a_l, \quad (4)$$

де $T_Q = L/(sg)$ – коефіцієнт математичної моделі;

Q_n – номінальне значення подачі при номінальній кутовій швидкості відцентрового насосу в робочій точці, м³/с.

Відповідно з [3] динамічні характеристики ділянки гідравлічної мережі під час регулювання напору записуються за допомогою наступного диференціального рівняння

$$\begin{aligned} & \frac{T_Q}{2Q_n(a_p + a_l)} \frac{d\Delta H}{dt} + \Delta H = \\ & = \frac{(1-\beta)T_Q}{2Q_n(a_p + a_l)} \frac{2H_0}{\omega_n} \frac{d\Delta \omega}{dt} + \frac{(1-\alpha)a_l}{(a_p + a_l)} \frac{2H_0}{\omega_n} \Delta \omega \end{aligned} \quad (5)$$

Еквівалентна двохфазна математична модель приводного асинхронного двигуна (АД) під час роботи насоса із протитиском в синхронній системі координат описується за допомогою наступної системи диференціальних рівнянь

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{J} [T - T_l] = \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (|\psi_2| i_{1q}) \right] - \dots \\ & \dots - \frac{1}{J} \left[T_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + (T_n - T_0) \frac{\omega}{\omega_n} \sqrt{\frac{H_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} - H_{st}}{H_0 - H_{st}}} \right]; \\ \frac{di_{1d}}{dt} &+ \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m \right) i_{1d} = V_{1d} + \frac{u_{1d}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} &+ \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha \beta L_m \right) i_{1q} = V_{1q} + \frac{u_{1q}}{\sigma}; \\ \frac{d|\psi_2|}{dt} &+ \alpha |\psi_2| = \alpha L_m i_{1d}; \\ \frac{d\varepsilon_0}{dt} &= \omega_0 = \omega p_n + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{|\psi_2|} + \kappa_1 (e_{1d} - \hat{i}_{1d}), \quad \varepsilon_0(0) = 0; \\ \frac{e_{1d}}{dt} &= \kappa (i_{1d} - \hat{i}_{1d}), \end{aligned} \right. \quad (6)$$

де ω_0 – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с;

J – сумарний момент інерції електропривода, кгм²;

T – електромагнітний момент двигуна, Нм;

T_l – момент навантаження, Нм;

$p_n = 1$ – число пар полюсів;

L_1, L_2, L_m – індуктивність обмотки статора, ротора та контуру намагнічування, Гн;

$|\psi_2|$ – модуль вектора потокозчеплення ротора,

Вб;

i_{1d}, i_{1q} – компоненти вектора струму статора, А;

T_0 – момент на валу насосу при номінальній кутовій швидкості та $Q=0$, Нм;

T_n – номінальний момент відцентрового насосу, Нм;

$\alpha = R_2/L_2, \beta = L_m/\sigma L_2, \sigma = L_1 - L_m^2/L_2$ – коефіцієнти математичної моделі;

R_1, R_2 – активний опір обмотки статора та ротора, Ом;

U_{1d}, U_{1q} – компоненти вектора напруги статора, В;

ε_0 – кутове положення рухомої системи координат (d-q) відносно нерухомої системи координат (a-b), рад;

V_{1d}, V_{1q} – обмежені за величиною ($V_{1d} \leq V_{1d}^0, V_{1q} \leq V_{1q}^0$), проте невизначені координатні збурення;

\hat{i}_{1d} – оцінене значення польової компоненти вектора струму статора;

$(\kappa, \kappa_l) > 0$ – параметри налаштування спостерігача компоненти вектора струму статора i_{1d} .

Розглянемо контур регулювання напору ділянки гідравлічної мережі без рахування інерційності оптимізованого контуру компоненти струму статора. Після підстановки в диференціальне рівняння ділянки гідравлічної мережі (5) першого рівняння системи (6) отримується залежність напору мережі від компоненти вектора струму статора i_{1q}

$$\begin{aligned} & \frac{T_Q}{2Q_n(a_p + a_l)} \frac{dH}{dt} + H = \\ & = \frac{T_Q}{Q_n(a_p + a_l)} \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[\frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (|\psi_2| i_{1q}) \right] + V_H \\ V_H &= - \frac{T_Q}{Q_n(a_p + a_l)} \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[T_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + \dots \right. \\ & \dots + (T_n - T_0) \frac{\omega}{\omega_n} \sqrt{\frac{H_0 \frac{\omega^2}{\omega_n^2} - H_{st}}{H_0 - H_{st}}} \left. \right] + \dots \\ & \dots + \frac{a_l}{(a_p + a_l)} \frac{2H_0}{\omega_n} \omega, \end{aligned} \quad (7)$$

де V_H – обмежені за величиною невизначені координатні збурення ($V_H \leq V_H^0$).

Як видно з (7), об'єкт регулювання контуру напору гідравлічної мережі описується диференціальним рівнянням першого порядку, параметри якого можуть змінюватися внаслідок розглянутих збурень.

Відповідно до концепції зворотної задачі динаміки [1] порядок бажаного рівняння замкнутого контуру напору також матиме перший порядок

$$\dot{z} + \gamma_H z = \gamma_H H^*, \quad (8)$$

де z – вихідна координата;

γ_H – коефіцієнт, за допомогою якого задається бажана тривалість t_{nn} монотонного (аперіодичного) перехідного процесу напору $\gamma_H \approx 3/t_{nn}$.

Рівняння (8) забезпечує астатизм першого

порядку регулювання напору та задану добротність по швидкості рівну $D_{\omega}^z = \gamma_H$. Ступінь наближення реального процесу керування до бажаного оцінюється локальним функціоналом, який є функцією Ляпунова для замкнутої системи та характеризує нормовану енергію прискорення

$$G(i_{1q}^*) = \frac{1}{2} \left[\frac{z(t)}{dt} - \frac{H(t, i_{1q}^*)}{dt} \right]^2. \quad (9)$$

Мінімізація функціонала здійснюється за градієнтним алгоритмом першого порядку

$$\frac{di_{1q}^*(t)}{dt} = -\lambda_H \frac{dG(i_{1q}^*)}{di_{1q}^*}, \quad (10)$$

де $\lambda_H > 0$ – константа.

Похідна локального функціонала (9) дорівнює

$$\frac{dG(i_{1q}^*)}{di_{1q}^*} = -\frac{1.5T_Q H_0 P_n L_m |\psi_2|}{Q_n (a_p + a_l) \omega_n J L_2} \left(\frac{dz}{dt} - \frac{dH}{dt} \right). \quad (11)$$

В результаті підставки (11) в (10) отримується алгоритм керування напором гідравлічної мережі

$$\frac{di_{1q}^*(t)}{dt} = k_H \left(\frac{dz(t)}{dt} - \frac{dH(t)}{dt} \right), \quad (12)$$

де $k_H = (1.5T_Q P_n L_m |\psi_2| \lambda_H H_0) / (Q_n (a_p + a_l) \omega_n J L_2) = const$ – коефіцієнт підсилення регулятора напору.

Після інтегрування (12) з урахуванням замикання зворотним зв'язком алгоритм керування напором гідравлічної мережі остаточно приймає вигляд

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= k_H (z - H); \\ z &= \gamma_H \int_0^t (H^* - H) dt. \end{aligned} \quad (13)$$

Диференціальне рівняння реального замкнутого контуру керування напором отримується після підстановки алгоритму керування (13) в рівняння (7)

$$\ddot{H} + k\dot{H} + k\gamma_H H = k\gamma_H H^*, \quad (14)$$

$$\text{де } k = \frac{3H_0 P_n |\psi_2| k_H L_m}{J \omega_n L_2}.$$

Рівняння (7) показує, що процес керування відповідно до критерію стійкості Гурвіца є стійким навіть при необмеженому підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора напору $k_H \rightarrow \infty$. Це ж забезпечує повне співпадіння реального (14) та бажаного (8) процесів керування, що очевидно при діленні всіх членів рівняння (14) на коефіцієнт k при умові $k_H \rightarrow \infty$

$$\frac{\ddot{H}}{k} + \dot{H} + \gamma_H H = \gamma_H H^*. \quad (15)$$

Ця особливість забезпечує слабку чутливість сис-

теми до параметричних збурень. Під час роботи процес в контурі напору протікає по траєкторії, що назначена рівнянням бажаної якості (8). Звичайно, при допустимому з точки зору технічної реалізації коефіцієнті підсилення регулятора існує динамічна похибка, допустима величина якої встановлюється технічними вимогами до якості керування.

Висновки. Розроблений алгоритм керування напором насосної установки з векторно-керованим асинхронним двигуном забезпечує високу якість керування в умовах зміни параметрів гідравлічної мережі та електроприводу.

Список використаних джерел

1. Островерхов М. Я. Керування електромеханічними системами на основі мінімізації локальних функціоналів миттєвих значень енергій / М. Я. Островерхов, М.П. Бурик // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 1/2013(21). – С. 40-47. – ISSN 2074-9937.
2. Пересада С. М. Грубое векторное управление моментом и потоком асинхронного двигателя: теория и экспериментальное тестирование / С. М. Пересада, С. Н. Ковбаса, В. С. Бовкунович // Тематичний випуск науково-технічного журналу "ЕЛЕКТРОІНФОРМ". – Л.: НТУ "ЛПІ", 2009. – №19. – С. 69-73.
3. Демченко В. А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС: Учебное пособие. – Одесса: "Астропринт", 2001. – 305 с. – ISBN 966-549-541-0.

Аннотация

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПОРА НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ СО СВОЙСТВАМИ СЛАБОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ПАРАМЕТРИЧЕСКИМ ВОЗМУЩЕНИЯМ

Островерхов Н. Я., Бурик Н. П.

Предложен алгоритм управления насосной установкой с векторно-управляемым асинхронным электроприводом на основании концепции обратных задач динамики в соединении с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергии, что обеспечивает высокое качество управления напором в условиях действия параметрических возмущений.

Abstract

SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL PRESSURE PUMPING UNIT WITH PROPERTIES LOW SENSITIVITY TO PARAMETRIC DISTURBANCES

M. Ostroverkhov, M. Buryk

The algorithm of control of pump installation with vector-controlled asynchronous electric drive based on the concept of inverse-dynamics villas in conjunction with local minimization functional instantaneous power values, which ensures high quality pressure control in conditions of parametric disturbances.