



УДК 681.515

## ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ НАПОРУ ВІДЦЕНТРОВОГО НАСОСУ

**Островерхов М. Я., д.т.н.,**

**Бурик М. П., к.т.н.**

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Телефон:(096)849-0-949

**Анотація** - запропоновано систему керування насосною установкою з векторно-керованим асинхронним електроприводом на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії, яка забезпечує якісне регулювання напором в умовах дії параметричних збурень та має задовільні енергетичні показники.

**Ключові слова:** енергоефективність, система керування, відцентровий насос.

*Постановка проблеми.* Для перекачування відцентровими насосами рідин у різних галузях народного господарства витрачається мільярди кВт·год електроенергії [1]. Для зменшення використання електроенергії використовують системи з частотним регулюванням. Але постійне зростання електроенергії та вимоги до якості керування напором насосної установки вимагають застосування векторно-керованих асинхронних електроприводів, які мають задовільні енергетичні показники. На якість керування напором гідравлічної мережі впливає багато різних факторів, а саме: зміна параметрів мережі, відхилення характеристик насосу, неточне визначення параметрів установки та варіація параметрів асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором (АД).

Це обумовлює застосування робастної системи керування з векторно-керованим електроприводом, яка забезпечує під час дії параметричних збурень енергоефективне регулювання напором гідравлічної мережі.

*Аналіз останніх досліджень.* Низька вартість та висока надійність при експлуатації є основною перевагою асинхронних електроприводів над іншими. Але АД - складна взаємозв'язана та нелінійна система. Тому необхідно використовувати алгоритми керування, що забезпечують слабку чутливість системи керування до дії різних дестабілізуючих факторів та просту декомпозицію системи. Алгоритми керування на основі концепції зворотних



задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергій забезпечують грубість до параметричних збурень та стабілізацію динамічних та статичних показників електропривода [2].

Переваги запропонованого методу керування координатами асинхронних електроприводів є наступними:

- проста реалізації представлених алгоритмів керування за рахунок відсутності диференціальних ланок;
- коефіцієнти регуляторів не залежать від параметрів об'єкту регулювання;
- процеси в реальному контурі прямують до бажаних за рахунок підвищення коефіцієнта підсилення, при цьому забезпечується динамічна декомпозиція системи;
- стійкість контуру керування зберігається при підвищенні коефіцієнта підсилення регулятора.

**Формулювання цілей статті.** Дослідити розроблену систему керування напором насосної установки з векторно-керованим асинхронним електроприводом, що забезпечить енергоефективне регулювання під час дії різних дестабілізуючих факторів.

**Основні матеріали дослідження.** Нелінійна модель простої ділянки гідравлічної мережі та динамічна модель мережі з насосом показані в [2, 3].

Еквівалентна двохфазна математична модель АД у синхронній системі координат з урахуванням диференціального рівняння ділянки гідравлічної мережі під час роботи відцентрового насосу з протитиском описується за допомогою системи

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{T_Q}{2Q_n(a_p + a_l)} \frac{dH}{dt} + H = \frac{T_Q}{Q_n(a_p + a_l)} \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_2 |i_{1q}) \right] + V_H, \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[ \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{L_2} (\psi_2 |i_{1q}) \right] - \frac{1}{J} [T_1]; \\ \frac{di_{1d}}{dt} + \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m \right) i_{1d} = V_{1d} + \frac{u_{1d}}{\sigma}; \\ \frac{di_{1q}}{dt} + \left( \frac{R_1}{\sigma} + \alpha\beta L_m \right) i_{1q} = V_{1q} + \frac{u_{1q}}{\sigma}; \\ \frac{d|\psi_2|}{dt} + \alpha |\psi_2| = \alpha L_m i_{1d}; \\ \frac{d\varepsilon_0}{dt} = \omega_0 = \omega p_n + \frac{\alpha L_m i_{1q}}{|\psi_2|} + k_1 (e_{i1d} - \hat{i}_{1d}), \quad \varepsilon_0(0) = 0; \\ \frac{e_{i1d}}{dt} = k (i_{1d} - \hat{i}_{1d}), \end{array} \right. \quad (1)$$

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

$L$  – повна довжина ділянки, м;



$s$  – переріз трубопроводу, м<sup>2</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$Q_n$  – номінальне значення подачі при номінальній кутовій швидкості відцентрового насосу в робочій точці, м<sup>3</sup>/с;

$H$  – напір насосу, м;

$a_p$  – гідравлічний опір насосу, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;

$a_l$  – коефіцієнт опору гідравлічної мережі, с<sup>2</sup>/м<sup>5</sup>;

$H_0$  – напір насосу при  $Q=0$  та номінальній кутовій швидкості, м;

$Q$  – об'ємна подача, м<sup>3</sup>/с;

$\omega$  – кутова швидкість насосу, рад/с;

$\omega_n$  – номінальна кутова швидкість, рад/с;

$V_H = -\frac{T_Q}{Q_n(a_p + a_l)} \frac{H_0}{\omega_n} \frac{1}{J} T_l + \frac{a_l}{(a_p + a_l)} \frac{2H_0}{\omega_n} \omega$  – обмежені за величиною

невизначені координатні збурення ( $V_H \leq V_H^0$ ).

$\omega_0$  – кутова швидкість обертання магнітного поля, рад/с;

$J$  – сумарний момент інерції електропривода, кгм<sup>2</sup>;

$T$  – електромагнітний момент двигуна, Нм;

$T_l = T_0 \frac{\omega^2}{\omega_i^2} + (T_i - T_0) \frac{\omega}{\omega_i} \sqrt{\frac{H_0 \frac{\omega^2}{\omega_i^2} - H_{st}}{H_0 - H_{st}}}$  – момент навантаження, Нм;

$H_{st}$  – статичний напір, який йде на підйом рідини на необхідну висоту, м;

$p_n=1$  – 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;

$\varepsilon_o$  – 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;

$(\kappa, \kappa_1) > 0$  – параметри налаштування спостерігача компоненти вектора струму статора  $i_{1d}$ .



Розробка алгоритмів керування координатами з векторно-керуваної системи основі запропонованого методу концепції наведено [4], а алгоритм керування напором гідравлічної мережі представлено в [2]. Алгоритм керування напором гідравлічної системи описується як

$$i_{1q}^* = k_H (\gamma_H \int_0^t (H^* - H) dt - H), \quad (2)$$

де  $k_H$  – коефіцієнт підсилення регулятора напору;

$\gamma_H$  – коефіцієнт, за допомогою якого задається бажаний час  $t_{mn}$  монотонного перехідного процесу напору  $\gamma_H \approx 3/t_{mn}$ ;

$i_{1q}^*$  – задане значення моментної складової вектора струму, А.

Регулятори мають наступні параметри: компонент струму статора:  $\gamma_{i1q} = \gamma_{i1d} = 500$ ,  $k_{i1q} = k_{i1d} = 50$ ; напір насосної установки  $\gamma_H = 100$ ,  $k_H = 1$ ; модуль потокозчеплення ротора  $\gamma_\psi = 100$ ,  $k_\psi = 200$ . Параметри спостерігача компоненти вектора струму статора  $i_{1d}$  дорівнюють  $\kappa = 50$ ,  $\kappa_I = 10$ .

Дослідження розробленої системи регулювання напором насосної установки проведено шляхом моделювання при дії параметричного збурення, зокрема, зменшення на 40 % номінального значення активного електричного опору обмотки ротора  $R_2$ . Номінальні дані АД:  $P_H = 3$  кВт,  $\omega_H = 300$  рад/с,  $U_{1H} = 380$  В,  $f_{1H} = 50$  Гц – відповідно номінальна потужність, кутова швидкість, лінійна напруга та частота напруги;  $R_1 = 2,5$  Ом,  $R_2 = 1,6$  Ом - активні опори обмоток статора та ротора,  $J = 0,007$  кгм<sup>2</sup> — момент інерції двигуна;  $T_I = 10$  Н·м – момент навантаження. Довжина гідравлічної мережі дорівнює 100 м. Рідина підіймається на висоту  $H_{st} = 65,5$  м. У досліді відцентровий насос типу NMD 25/190B/A, який забезпечує подачу рідини 4,5 м<sup>3</sup>/г та має повний напір 71 м.

Моделювання проводилось за наступною послідовністю:

1) в початковий момент часу  $t=0$  с електродвигун прискорюється по заданій траєкторії напору до номінальної кутової швидкості за 2 с;

2) на 3 с виникає різкий стрибок тиску за рахунок зменшення споживання рідини на  $H_c = 15$  м;

3) в момент часу  $t=4$  с виникає різке збільшення тиску на 15 м.

Суцільною лінією на рис. 1 зображені графіки середньоквадратичного значення активної потужності за цикл  $t=5$  с при номінальних параметрах АД, а пунктирною лінією – при дії збурення.

Графіки ефективних активних значень активних потужностей АД показують, що система керування забезпечує однакове споживання активної потужності 2300 Вт за цикл 5с під час дії збурення та при номінальних параметрах АД. В момент часу від 0,5 до 0,88 с під час прискорення АД параметричне збурення призводить до збільшення



споживання середньоквадратичного значення активної потужності на 228 Вт відносно 160 Вт. Зміна тиску в гідравлічній мережі не впливає на енергетичні показники системи за рахунок зменшення та збільшення споживання рідини.

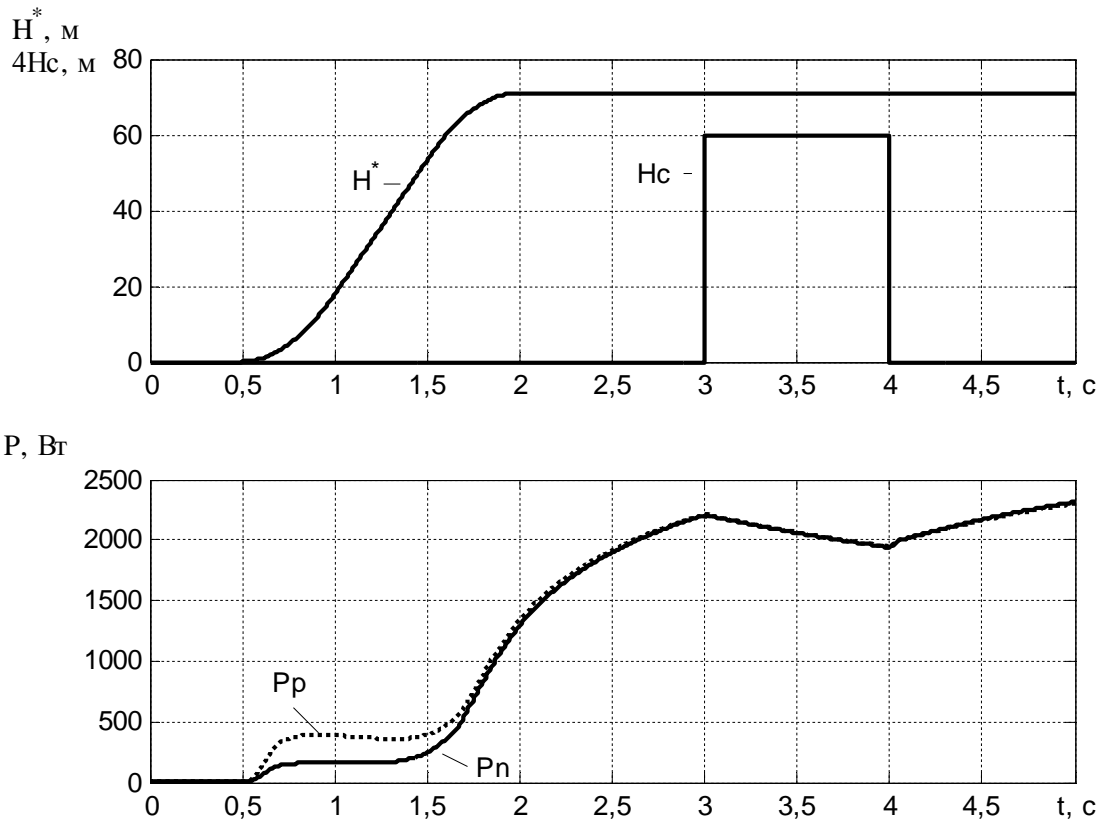


Рис. 1. Графіки заданої траєкторії напору насосної установки та середньоквадратичних значень активних потужностей АД

**Висновок.** Розроблена груба система керування насосною установкою з векторно-керованим асинхронним електроприводом на основі концепції зворотних задач динаміки в поєднанні з мінімізацією локальних функціоналів миттєвих значень енергії забезпечує задовільні енергетичні показники під час дії збурення.

#### Список використаних джерел.

1. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных и воздуходувных установках / Б.С. Лезнов // . – М.: Энергоатомиздат, 2006. – 360 с.

2. Островерхов М.Я. Система автоматического регулирования напора насосной установки с свойствами слабой чувствительности до параметрических возмущений / М.Я. Островерхов, М.П. Бурик // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 175



“Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження АПК України”. – Харків. ХНТУСГ, 2016. – 173 с. – ISBN 5-7987-0176X.

3. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС: Учебное пособие / В.А. Демченко – Одесса: «Астропринт», 2001. – 305 с. – ISBN 966-549-541-0.

4. 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.

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ СИСТЕМА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПОРОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Островерхов Н.Я, Бурик Н.П.

*Аннотация* – предложена система регулирования насосной установкой с векторно-управляемым асинхронным электроприводом на основе концепции обратных задач динамики в сочетании с минимизацией локальных функционалов мгновенных значений энергии, которая обеспечивает качественное регулирование напором в условиях действия параметрических возмущений и имеет удовлетворительные энергетические показатели.

## ENERGY-EFFICIENT CONTROL SYSTEM OF PRESSURE OF CENTRIFUGAL PUMP

M. Ostroverkhov, M. Buryk

### *Summary*

The control system of a pumping unit with a vector-controlled asynchronous electric drive based on the concept of inverse problems of dynamics combined with the minimization of the local instantaneous energy values functional that has provided qualitative of pressure control under the conditions of parametric perturbations and has satisfactory energy performances.