

УДК 62-505

Боднарук О.Ю.

Кафедра автоматизації електротехнічних і мехатронних комплексів

НЕЛІНІЙНЕ КЕРУВАННЯ НАСОСНОЮ СТАНЦІЄЮ У РЕЖИМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТИСКУ

Анотація. У даній роботі пропонується розробка системи автоматичного керування насосної установки у режимі стабілізації тиску. Здійснений розрахунок керуючих впливів керування тиском у системі, це дозволило зробити систему ефективнішою. Згідно методу динамічного програмування обираємо мінімізували похибки у підтримці рівня тиску системи. Для реалізації самої процедури синтезу схеми перейшли від структурної схеми до системи лінеаризованих диференціальних рівнянь. За допомогою методу цифрового моделювання було виконано дослідження каскадної системи із синтезованим регулятором. При використанні синтезованого регулятора квадратична похибка при відпрацюванні значно зменшилась. На базі даних розрахунків у подальшому успішно розроблено алгоритм роботи системи керування насосними агрегатами та перевірено його працездатність шляхом комп'ютерного моделювання. Для покращення якості перехідного процесу в умовах змін параметрів об'єкта керування, які неможливо контролювати, розроблено алгоритм налаштування ПІД-регулятора з використанням системи, що володіє перевагами нечіткої логіки. Вказано на ефективність розробленого алгоритму при дії на об'єкт керування, на підставі чого можна зробити висновок, що реалізація адаптивних нечітких ПІД-регуляторів дасть змогу покращити показники якості функції передачі системи автоматичного регулювання потужності на валі двигуна насоса, який функціонує в умовах постійних змінних навантажень. Розроблений алгоритм не потребує спеціальних методів ідентифікації параметрів насоса, а його реалізація за допомогою сучасних мікроконтролерів є достатньо простою та доступною.

Ключові слова: ПІД-регулятор, насосна станція, ідентифікація

Abstract. This article describes the development of an automatic control system for a pumping plant in a pressure stabilization mode. The calculation of control influences on the pressure management in the system made it possible to make the system more efficient. According to the dynamic programming method, we select minimized errors in maintaining the system pressure level. To implement the synthesis procedure itself, the scheme was improved from a structural design to a system of linearized differential equations. A cascade system with a synthesized regulator was investigated using digital simulation. With the use of the synthesized regulator, the quadratic error during exercise has been significantly reduced. On the basis of calculation data, the algorithm of operation of the system of control pumping units was successfully developed and its operability was tested by computer simulation. To improve the quality of the transition process under the conditions of changes in the parameters of the control object, which is impossible to control, an algorithm for setting the PID-controller is developed using a system with the advantages of fuzzy logic. The efficiency of the developed algorithm is indicated when the control object is affected, on the basis of which it can be concluded that the implementation of adaptive fuzzy PID-The regulators will improve the transmission performance of the automatic power control system on the pump engine shaft operating under constant variable loads. The developed algorithm does not require special methods of identification of pump parameters, and its implementation with the help of modern

microcontrollers is quite simple and accessible.

Key words: *PID-regulator, pumping station, identification*

Вступ. Системи насосних установок є одним з найважливіших об'єктів автоматизації промисловості Їх надійна та безвідмовна робота значною мірою визначає продуктивність об'єкту, безпека роботи персоналу. Відповідно до цього, алгоритми управління такими системами мають забезпечувати своєчасне включення насосів системи насосної установки, а також виключення можливих перевантажень двигунів та гідравлічної мережі в цілому. З раціональним управлінням швидкістю асинхронних двигунів, що використовуються в насосах систем водовідливу, успішно справляються перетворювачі частоти на базі IGBT – транзисторів [1]. Вони забезпечують плавність вимірювання швидкості, а відповідно, та продуктивності насосів, виключають перевантаження двигунів під час пуску. За відсутності суттєвих обмежень у бюджеті підприємства, використання таких перетворювачів доцільно до роботи з кожним насосом окремо. Для великих потужностей електродвигунів установка кількох перетворювачів частоти у систему насосної установки стає неможливою саме через фінансових міркувань та у сучасних насосних установках використовується каскадне керування. При такому управлінні лише один із насосів живиться від перетворювача частоти, а інші запускаються від мережі за допомогою контактора, або в кращому випадку від пристрою плавного пуску лінійним наростанням напруги. І тут у перетворювачі частоти програмно включений ПІД – регулятор тиску у вивідному трубопроводі або рівня води. При прямому запуску додаткових насосів регулятор технологічного параметра в перетворювачі частоти не встигає у повній мірою компенсувати збільшення тиску та в системі водовідливу відбувається гідравлічний удар, який часто призводить до прориву труб та зупинки всього комплексу.

Мета та завдання. В сучасних системах водопостачання все частіше використовується каскадне керування декількома насосами, замість регулювання продуктивності одного великої потужності. Це дозволяє суттєво підвищити енергоефективність обладнання, особливо протягом добової зміни споживання води. Особливості регулятора тиску, що керує регульованим насосом, двигун якого живиться від перетворювача частоти є те, він налаштовується не враховуючі існуючі додаткові насоси. А особливістю роботи такої каскадної системи керування є те, що регулювання тиску здійснюється основним регульованим насосом, а в разі необхідності підключається ще й додатковий нерегульований. Тобто, у сучасних каскадних системах керування тиском керуючих вплив на регульований насос не містить змінних, що відповідають релейному перемикачню нерегульованих насосів, тобто алгоритм керування є лінійною функцією від різниці заданого та поточного тиску. У більшості випадків для стабілізації тиску в системі використовується ПІД – регулятор, який забезпечує у більшості випадки достатню точність регулювання. Основним недоліком такого регулятора є те, що він не враховує вмикання нерегульованих насосів і фактично визначає їх як збурення для існуючого контуру.

Матеріал і результати досліджень. У той же час раціональним було б врахування керуючих впливів від некерованих насосів як складову функції керування тиском на виході гідравлічної системи, детальніше:

$$U = f(P_{\text{set}} - P_{\text{act}}) + \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \theta(P_{\text{set}} - P_{\text{act}}) \quad (1)$$

де: Q_i – продуктивність окремого некерованого насосу; θ – функція Гевісайда; n – кількість некерованих насосів, що в нашій структурній схемі дорівнює одиниці; $P_{\text{set}} - P_{\text{act}}$ – різниця між заданим та поточним значенням; $f(P_{\text{set}} - P_{\text{act}})$ – безперервна

функція зміни вихідного сигналу регулятора.

Щодо реалізації такого алгоритму керування, яка містить, як аналогову, так і дискретні складові доцільно привести їх до одного типу, це і дозволить використовувати для синтезу регулятора відомі методики. Використаємо заміну нелінійної залежності в функції Гевісайда лінійною залежністю із коефіцієнтом, що залежить від аргументу. При використанні такої процедури «миттєвої» лінеаризації, нелінійна залежність замінюється на лінійну:

$$\theta(P_{\text{set}} - P_{\text{act}}) = K(P_{\text{set}} - P_{\text{act}}) * (P_{\text{set}} - P_{\text{act}}), \quad (2)$$

$$\text{де } K(P_{\text{set}} - P_{\text{act}}) = \begin{cases} \frac{1}{P_{\text{set}} - P_{\text{act}}}, & P_{\text{set}} - P_{\text{act}} \geq P_{\text{пад}} \\ 0, & P_{\text{set}} - P_{\text{act}} < P_{\text{пад}} \end{cases} \quad - \text{ коефіцієнт лінеаризації,}$$

перераховується в режимі реального часу при кожній зміні аргументу функції; $P_{\text{пад}}$ – падіння тиску відносно заданого значення, при якому вмикається додатковий насос. Структурна схема системи керування тиском із представленням керування некерованими насосами як одного із керуючих впливів має вигляд:

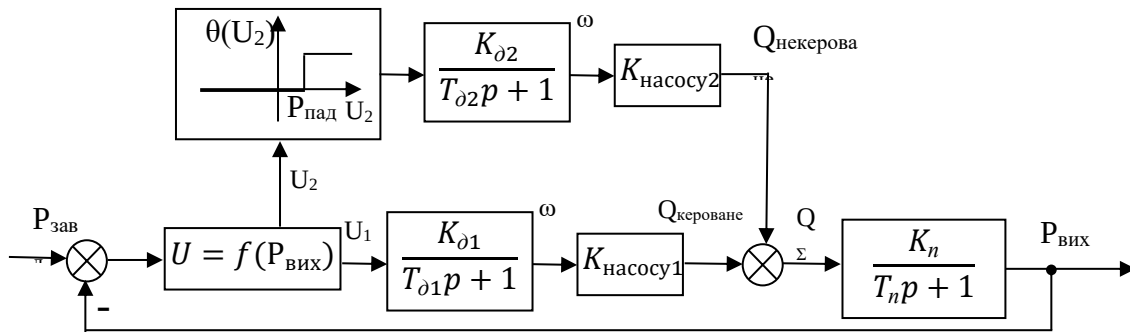


Рисунок 1. Структурна схема контуру регулювання тиску з урахуванням зміни продуктивності некерованих насосів у вигляді керуючого впливу.

Позначення на рисунку 1: $P_{\text{завд}}$ – задане значення тиску, $P_{\text{вих}}$ – вихідне або поточне значення тиску, ω – поточна швидкість керованого насосу, Q – поточна продуктивність керованого насосу, $Q_{\text{некероване}}$ – поточна сумарна продуктивність некерованого насосу, Q_{Σ} – сумарна продуктивність насосної станції, $K_{\text{д1}}, T_{\text{д1}}, K_{\text{д2}}, T_{\text{д2}}$ – коефіцієнт підсилення та стала часу двигуна керованого та некерованого насосу, $K_{\text{насосу1}}, K_{\text{насосу2}}$ – коефіцієнт продуктивності керованого та некерованого насосу; $K_{\text{п}}, T_{\text{п}}$ – коефіцієнт підсилення і стала часу технологічного процесу; $\theta(U_2)$ – функція Гевісайда, в залежності від функції керування некерованим насосом; U_1, U_2 – функції керування на виході системи управління.

Таким чином отримуємо структурну схему третього порядку із двома керуючими впливами та однією суттєвою нелінійністю. Для такої системи доцільно синтезувати квазіоптимальний нелінійний регулятор методом динамічного програмування з використанням концепції методу Пірсона [2], шляхом лінеаризації нелінійності методом «січних» [3].

Для реалізації процедури синтезу необхідно перейти від структурної схеми до системи лінеаризованих диференціальних рівнянь (3):

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + a_2 (x_2 + x_3); \\ \dot{x}_2 = -a_3 x_2 + b_1 U_1; \\ \dot{x}_3 = -a_4 x_3 + b_2 U_2; \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{де } x_1 = P_{\text{вих}}; x_2 = Q_{\text{кероване}}; x_3 = Q_{\text{некероване}}; a_1 = \frac{1}{T_{\text{п}}}; a_2 = \frac{K_{\text{п}}}{T_{\text{п}}}; a_3 = \frac{K_{\text{насосу1}}}{T_{\text{д1}}}; a_4 =$$

$\frac{K_{\text{насосу2}}}{T_{\text{д2}}}$; $b_1 = \frac{K_{\text{насосу1}} K_{\text{д1}}}{T_{\text{д1}}}$; $b_2 = \frac{K_{\text{насосу2}} K_{\text{д2}} K(P_{\text{вих}})}{T_{\text{д2}}}$; $K(P_{\text{вих}})$ – коефіцієнт лінеаризації методом «січних».

Згідно методу динамічного програмування обираємо функціонал якості, який необхідно мінімізувати. Оскільки в першу чергу для системи керування першочергово ставиться вимога високої точності по підтримки рівня тиску, вибираємо квадратичний функціонал якості з обмеженням на середньоквадратичну похибку. Для виключення частих перемикань контактора доцільно мінімізувати керуючі впливи в синтезованій системі, тоді квадратичний функціонал якості матиме вигляд [4]:

$$\min_{U_1, U_2} J = \int_0^\infty [q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + r_1 U_1^2 + r_2 U_2^2 + U_{1\text{опт}}^2 + U_{2\text{опт}}^2] dt, \quad (4)$$

де $U_{1\text{опт}}$, $U_{2\text{опт}}$ – оптимальні впливи за відповідними каналами; $q_1 = \frac{1}{x_{1\text{max}}^2}$; $q_2 = \frac{1}{x_{2\text{max}}^2}$; $q_3 = \frac{1}{x_{3\text{max}}^2}$; $r_1 = \frac{1}{U_{1\text{max}}^2}$; $r_2 = \frac{1}{U_{2\text{max}}^2}$ – вагові коефіцієнти, що визначають обмеження на максимальні відхилення змінних стану та керуючих впливів.

Останні дві складові функціоналу якості формують додаткові обмеження на оптимальне керування, це не призводить до якісної зміни алгоритму керування, та дає можливість вирішувати а лінійну алгебраїчну систему рівнянь замість системи квадратичних рівнянь. Для системи лінеаризованих диференційних рівнянь та вибраного функціоналу якості складаємо функціональне рівняння Белмана:

$$\min_{U_1, U_2} J = q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + r_1 U_1^2 + r_2 U_2^2 + \frac{\partial S}{\partial x_1} (-a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_2 x_3) + \frac{\partial S}{\partial x_2} (-a_3 x_2 + b_1 U_1) + \frac{\partial S}{\partial x_3} (-a_4 x_3 + b_2 U_2) = 0, \quad (5)$$

де S – квадратична функція Белмана.

Виконуємо пошук мінімуму функції за керуючими впливами U_1 , U_2 . При цьому беремо похідну за цими ж керуючими впливами, і в результаті отримуємо керування в явному вигляді:

$$U_1 = -\frac{b_1}{2r_1} \frac{\partial S}{\partial x_2}; U_2 = -\frac{b_2}{2r_2} \frac{\partial S}{\partial x_3}. \quad (6)$$

Дані вирази підставляємо у функціональне рівняння і отримуємо модифіковане рівняння Гамільтона – Якобі – Белмана (замкнений формі):

$$q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + \frac{\partial S}{\partial x_1} (-a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_2 x_3) - a_3 \frac{\partial S}{\partial x_2} x_2 - a_4 \frac{\partial S}{\partial x_3} x_3 = 0 \quad (7)$$

Рішенням цього рівняння є функція S , що для лінеаризованої системи диференційних рівнянь та квадратичного функціоналу визначається у вигляді квадратичної форми, тобто $S = \sum_{ij=1}^3 K_{ij}^2 x_i x_j$, $K_{ij} = K_{ji}$.

Вирази для похідних підставляємо в рівняння Гамільтона – Якобі – Белмана, отримуємо:

$$q_1 x_1^2 + q_2 x_2^2 + q_3 x_3^2 + (2K_{11}x_1 + 2K_{12}x_2 + 2K_{13}x_3)(-a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_2 x_3) - a_3(2K_{12}x_1 + 2K_{22}x_2 + 2K_{23}x_3)x_2 - a_4(2K_{13}x_1 + 2K_{23}x_2 + 2K_{33}x_3)x_3 = 0 \quad (8)$$

Знаходимо коефіцієнти квадратичної форми та підставляємо їх в алгоритми керування, вирішуючи систему рівнянь:

$$U_1 = -\frac{b_1}{r_1} \left(\frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{a_3 + a_1} x_1 + \frac{q_1 + 2 \frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{a_3 + a_1} a_2}{2a_3} x_2 + \frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{2a_4 + a_1} a_2 + \frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{a_3 + a_1} a_2}{a_3 + a_4} x_3 \right)$$

$$U_2 = -\frac{b_2}{r_2} \left(\frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{2a_4 + a_1} x_1 + \frac{\frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{2a_4 + a_1} a_2 + \frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{a_3 + a_1} a_2}{a_3 + a_4} x_2 + \frac{q_3 + 2 \frac{\frac{q_1}{2a_1} a_2}{2a_4 + a_1} a_2}{2a_4} x_3 \right). \quad (9)$$

Графіки перехідних процесів при використанні класичного (ПД – регулятора) та синтезованого регулятора представлені на рисунку 2. Дослідження каскадної системи із синтезованим регулятором проведено методом цифрового моделювання. Варто уточнити, що при використанні синтезованого регулятора квадратична похибка при відпрацюванні завдання значно зменшується.

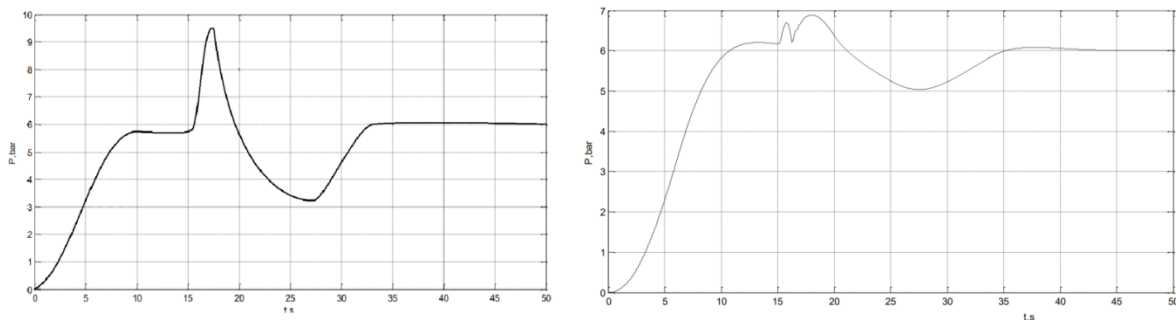


Рисунок 2. Графіки перехідних процесів при використанні ПД – регулятора (зліва) та синтезованого регулятора (справа).

Висновки. Дана система керування технологічним процесом і насосом безпосередньо забезпечує безаварійну роботу об'єкту керування та досягнення мети, яка була встановлена на початку розробки всієї системи. В ході виконання даної роботи дана тема розглядається з точки зору ефективності. Перспектива щодо покращення розглянутої системи відкрита, так як основним недоліком ПД-регулятора є те, що він не враховує вмикання нерегульованих насосів і фактично визначає їх як збурення для існуючого контуру, дана система може бути покращена, що і було вирішено у цій роботі.

Список використаних джерел

1. Чермалих А.В. «Вибір раціональних систем автоматизованого управління компресорних станцій теплового насосу/ А.В. Чермалих, В.М. Чермалих, І.Я. Майданський//Вісник НТУ «ХП», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях», 2012, №50 (956), с.107–116.
2. Pearson J. D. Approximation Methods in optimal control. Sub-optimal control. // Electronics and control. . 1962., No. 20 Vol. 13. P. 453-467.
3. Гельднер К. , Кубик С. Нелинейные системы управления . Москва: Мир, 1987. 368 с.
4. Справочник по теории автоматического управления / под ред. Красовского А.А. М: Наука, 1987. 712 с.

Робота виконана під керівництвом доц. Торопова А.В.