

A. В. БОСАК, А. В. ТОРОПОВ, В. Г. ДУБОВИК, Л. В. ТОРОПОВА, О. Ю. БОДНАРУК

КАСКАДНЕ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДАМИ НАСОСНОЇ СТАНЦІЇ НА ОСНОВІ АСТАТИЧНОГО НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА

В статті розглянуті основні особливості каскадного керування тиском в системі водопостачання із регульованим і додатковим нерегульованим насосом. Сформульовані недоліки існуючих систем керування і запропоновано здійснювати керування електроприводами насосної станції із корекцією швидкості обертавання регульованого насосу в залежності від режиму роботи нерегульованого. Розроблена спрощена математична модель контуру регулювання тиску із представленням вмикання додаткового насосу у вигляді збурюючого впливу аперіодичного характеру. При цьому закон керування додатковим насосом, описується у вигляді однозначних нелінійностей на основі одиначної ступінчастої і сигнатурної функцій, що дозволяє значно спростити його реалізацію у випадку використання мікропроцесорних пристроїв керування. Для зменшення впливу збурень в перехідних режимах роботи, а саме при вмиканні додаткового насосу, запропоновано використовувати в алгоритмі керування складову корекції швидкості для основного насосу. Для уникнення формування статичної похибки в роботі запропоновано використовувати регулятор тиску і інтегральною складовою. Далі розроблена уточнена математична модель в середовищі MATLAB і проведено дослідження роботи системи із пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором тиску для регулювання швидкості основного насосу. Визначено, що використання складової корекції дозволяє підвищити точність регулювання тиску, однак не дозволяє скомпенсувати наявність транспортного запізнення і нелінійностей системи. Тому, в якості регулятора тиску на виході гідравлічної системи використовується комбінований астатичний нечіткий регулятор на основі пропорційно-інтегрального алгоритму керування. Головна відмінність такого регулятора полягає у автоматичній зміні коефіцієнта підсилення при зміні помилки, що запобігає виникненню нестійких режимів при великих коефіцієнтах розімкнутої системи. Розроблена нечітка система керування дає низку переваг, таких як підвищення надійності водопровідної мережі, покращення робочих характеристик системи водопостачання для споживачів, зменшення зносу насосного обладнання та зниження споживання електроенергії, що підтверджується результатами цифрового моделювання.

Ключові слова: каскадне керування, одиначна ступінчаста функція, нечіткий регулятор, насосна станція, астатизм.

A. V. BOSAK, A. V. TOROPOV, V. H. DUBOVYK, L. V. TOROPOVA, O. YU. BODNARUK

CASCADE CONTROL OF ELECTRICAL DRIVES OF A PUMPING STATION BASED ON AN ASTATIC FUZZY REGULATOR

The article discusses the main features of cascade pressure control in a water supply system with a controlled and additional uncontrolled pumps. The disadvantages of the existing control systems are formulated and it is proposed to control the pump station electric drives using correction of speed of the controlled pump depending on the mode of operation of the uncontrolled pump. A simplified mathematical model of the pressure control loop was developed, with the representation of the switching on of the additional pump as a disturbance effect of an aperiodic behavior. At the same time, the control algorithm of the additional pump is described in the form of unequivocal nonlinearities based on single step and signature functions, which allows to significantly simplify its implementation in the case of using microprocessor devices. To reduce the impact of disturbances in transient operating modes, namely when the additional pump is switched on, it is proposed to use the speed correction component for the main pump in the control algorithm. To avoid the formation of a static error, it is suggested to use a pressure regulator with integral component. Next, a refined mathematical model in the MATLAB environment was developed and an investigation of system operation using proportional-integral-derivative controller of pressure main pump speed control was carried out. It was determined that using of correction component allows to increase the accuracy of pressure control, but does not allow to compensate the presence of transport delay and nonlinearities of the system. Therefore, as a pressure regulator of the hydraulic system output, a combined astatic fuzzy regulator based on a proportional-integral control algorithm is used. The main difference of such a regulator is the automatic change of the gain factor when the error changes, which prevents the occurrence of unstable modes with large coefficients of the open system. The developed fuzzy control system provides a lot of benefits, such as increasing the reliability of the water supply network, improving the performance of the water supply system for consumers, reducing the wear and tear of pumping equipment, and reducing electricity consumption, which is confirmed by the results of numerical modeling.

Keywords: cascade control, single step function, fuzzy controller, pumping station, astatism.

Вступ. Системи водопостачання є найбільшими споживачами енергії в комунальному господарстві, у загальних витратах на енергоносії яких припадає біля 60 % [1]. Питання енергоефективності цих систем завжди є актуальним і вирішується, як підвищенням ефективності окремих вузлів, так і шляхом оптимізації роботи установок в цілому. Одним з найпопулярніших способів підвищення енергоефективності систем водопостачання є використання замість одного насосу великої потужності насосної станції з декількома насосами, що вмикаються почергово, в залежності від падіння тиску в системі. Такий підхід дозволяє забезпечити роботу кожного з насосів в точці номінального режиму роботи й, відповідно, з номінальним ККД. Найбільшу точність регулювання

тиску в гідравлічній системі забезпечується у випадку, коли кожний з насосів станції обладнаний власним перетворювачем частоти для регулювання швидкості [2]. Проте така система є відносно дорогою і в Україні і більшості країн світу майже не використовується. Найбільш популярним способом керування тиском при використанні декількох насосів є каскадне керування. При такому підході в системі використовується лише один перетворювач частоти для зміни швидкості одного з насосів, а інші насоси, за необхідності, вмикаються в роботу за допомогою пускачів (контакторів чи пристроїв плавного пуску). При цьому можливий як незалежний пуск нерегульованих насосів (рис. 1), так перемикання насосу від перетворювача частоти на мережу і в зворотному напрямку (рис. 2) [3].

© А.В. Босак, А.В. Торопов, В.Г. Дубовик, Л.В. Торопова, О.Ю. Боднарчук, 2023

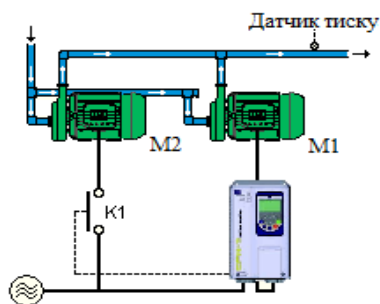


Рисунок 1 – Функціональна схема керування тиском із незалежним пуском додаткового насосу

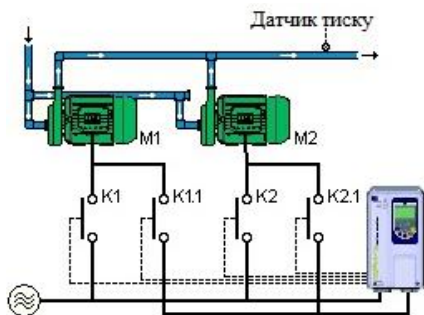


Рисунок 2 – Функціональна схема керування тиском із перемиканням додаткового насосу на мережу від перетворювача

Другий спосіб при цьому є менш надійним з точки зору працездатності системи в цілому, оскільки потребує точного визначення допустимого часу перемикання. Так, з одного боку, падіння швидкості насосу при перемиканні не повинно бути суттєвим, а з іншого, при швидкому переключенні можливе попадання напруги мережі на вихідні клеми перетворювача частоти, й вихід його з ладу. Тому, в роботі розглядається метод, коли перетворювач частоти підключений до одного насоса, а інший запускається від мережі за допомогою контактора.

Особливістю і відносним недоліком такої схеми керування водопостачанням є перепади тиску при вмиканні/вимиканні додаткового насосу. Існує два основних алгоритми вмикання/вимикання додаткових насосів – по зміні тиску і при зміні швидкості регульованого насосу. У випадку керування додатковим насосом по зміні тиску в гідравлічній системі гарантовано мають місце гідравлічні перевантаження, оскільки вимикання додаткового насоса можливо налаштувати лише по перевищенню уставки [4]. Відповідно, зазвичай в системах водопостачання використовується вмикання додаткового насосу, в залежності від швидкості основного. Так, якщо продуктивність регульованого насосу протягом тривалого часу складає 100 %, можна відзначити, що потужності основного насосу не вистачає і необхідно вмикати додатковий насос. Навпаки, коли регульований насос протягом тривалого часу працює на мінімальній швидкості, це значить, що тиск занадто великий і додатковий насос необхідно вимкати. Для зменшення

гідравлічного удару під час пуску додаткового насосу зазвичай основний насос переводиться в режим роботи із фіксованою мінімальною швидкістю [5]. При цьому регулювання тиску на виході гідравлічної системи фактично припиняється до моменту закінчення запуску додаткового насосу. Перехід в режим регулювання здійснюється по таймеру, що налаштовується емпірично і може призводити до неконтрольованого стрибку тиску в системі.

Відповідно, виникає необхідність врахування режиму роботи додаткового насосу при формуванні завдання по швидкості основним без вимикання регулятора тиску. Відзначимо, що закон керування додатковим насосом описується ланкою двопозиційного реле із гістерезисом, вхідним сигналом для якого є швидкість обертання основного насосу. Крім того, необхідно відмітити, що в системах водопостачання має місце транспортне запізнення між зміною швидкості обертання насосу і зміною тиску на виході. Зазвичай цей фактор не може бути в повній мірі скомпенсований типовими регуляторами, особливо в умовах впливу зовнішніх збурень випадкового характеру [6]. Отже, питання розробки регулятора тиску, нечутливого до зовнішніх збурень і наявності транспортного запізнення в системі водопостачання, що враховує вплив роботи додаткових насосів в перехідних режимах, є актуальним.

Мета і завдання статті. Побудова структури та дослідження системи управління насосною станцією, що дозволить підвищити якість стабілізації тиску на виході гідравлічної системи в перехідних режимах роботи при вмиканні і вимиканні додаткового насосу.

Для досягнення мети в роботі були вирішені наступні завдання:

1. Розроблено спрощену математичну модель системи регулювання тиску із представленням керування додатковим насосом у вигляді однозначної залежності на основі одиничної ступінчастої і сигнатурної функцій.
2. Сформовано закон керування основним насосом як суми вихідного сигналу астатичного регулятора і складової врахування впливу додаткового насосу.
3. Розроблено астатичний нечіткий регулятор із додатковою складовою у вигляді масштабованої ступінчастої функції.

Методи дослідження. Для синтезу закону керування основним регульованим насосом використовувався метод нечіткої логіки. Для дослідження динамічних характеристик системи із класичними та запропонованим нечітким регулятором використовувався метод цифрового моделювання.

Матеріал і результати дослідження. Для оцінки працездатності існуючих регуляторів тиску, що використовуються в сучасних системах водопостачання, і аналізу впливу додаткового насоса на її роботу, використаємо метод математичного моделювання. Для цього створимо спрощену математичну модель системи

водопостачання із двома насосами, що враховує інерційність зміни тиску в системі та зміни швидкості двигунів, в залежності від сигналу керування. Враховуючи, що інерційність електромагнітних процесів в двигунах насосів є значно меншою, ніж інерційність технологічного процесу зміни тиску, будемо використовувати для опису динаміки електроприводів насосів аперіодичну ланку першого порядку [7]. Без врахування чистого запізнювання зміни тиску система диференціальних рівнянь, що описує динамічні властивості контуру водопостачання, має вигляд:

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{дв}1}}\omega_1 + \frac{K_{\text{дв}1}}{T_{\text{дв}1}}U_1, \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{дв}2}}\omega_2 + \frac{K_{\text{дв}2}}{T_{\text{дв}2}}U_2, \quad (2)$$

$$\frac{dP_{\text{вих}}}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{ТП}}}\overset{\circ}{P}_{\text{вих}} + \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}}K_{\text{нас}1}\omega_1 + \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}}K_{\text{нас}2}\omega_2, \quad (3)$$

де U_1 – сигнал керування електроприводом керованого насосу;

U_2 – сигнал керування пускачем некерованого насосу;

$P_{\text{вих}}$ – тиск на виході гідравлічної системи;

ω_1, ω_2 – швидкості обертання першого та другого насосів, відповідно;

$K_{\text{ТП}}, T_{\text{ТП}}$ – коефіцієнт підсилення і стала часу технологічного процесу;

$K_{\text{дв}1}, T_{\text{дв}1}$ – коефіцієнт підсилення і стала часу двигуна першого насосу;

$K_{\text{дв}2}, T_{\text{дв}2}$ – коефіцієнт підсилення і стала часу двигуна другого насосу;

$K_{\text{нас}1}, K_{\text{нас}2}$ – коефіцієнти передачі першого та другого насосів, відповідно.

Керування додатковим насосом здійснюється за допомогою двопозиційного реле із гістерезисом, отже для аналітичного опису його роботи можна використати одиничні ступінчасті функції [8]:

$$U_2 = \begin{cases} 1(\omega_1 - \omega_{\text{max}}), \frac{d\omega_1}{dt} > 0, \\ 1(\omega_1 - \omega_{\text{min}}), \frac{d\omega_1}{dt} < 0. \end{cases} \quad (4)$$

де ω_{max} – швидкість основного насосу, при якій вмикається додатковий насос, ω_{min} – швидкість основного насосу, при якій вмикається додатковий насос.

Використовуючи сигнатурну функцію трансформуємо сигнал керування додатковим реле до вигляду:

$$U_2 = 1\left(\omega_1 - \frac{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}}}{2} - \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{2} \text{sign} \frac{d\omega_1}{dt}\right). \quad (5)$$

Відповідно система диференціальних рівнянь, що описує роботу системи водопостачання, запишеться:

$$\frac{dP_{\text{вих}}}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{ТП}}}\overset{\circ}{P}_{\text{вих}} + \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}}K_{\text{нас}1}\omega_1 + \frac{K_{\text{ТП}}}{T_{\text{ТП}}}K_{\text{нас}2}\omega_2, \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{дв}2}}\omega_2 + \frac{K_{\text{дв}2}}{T_{\text{дв}2}} \cdot 1\left(\omega_1 - \frac{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}}}{2} - \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{2} \text{sign} \frac{d\omega_1}{dt}\right), \quad (7)$$

$$\frac{d\omega_1}{dt} = -\frac{1}{T_{\text{дв}1}}\omega_1 + \frac{K_{\text{дв}1}}{T_{\text{дв}1}}U_1. \quad (8)$$

Аналізуючи рівняння (6)–(8) можна розглядати швидкістю другого насосу ω_2 як збурення аперіодичного характеру для контуру регулювання тиску. В залежності від стану додаткового насосу це збурення стає або рівним нулеві, або сталій величині, і може бути в повній мірі скомпенсоване інтегральною складовою регулятора по завершенню перехідного процесу. Відповідно, це забезпечить наявність астатизму першого порядку за вихідною координатою системи, що є обов'язковою вимогою при побудові систем водопостачання.

Для підвищення якості регулювання тиску в системі водопостачання при наявності збурення у формі одиничної ступінчастої функції використовуємо метод корекції по збурюючому впливу. Для цього в законі керування U формуємо сигнал, пропорційний керуючому впливу U_2 , тобто

$$U_1 = U_{\text{рег}} + K_{\text{кор}}U_2 = U_{\text{рег}} + K_{\text{кор}} \cdot 1\left(\omega_1 - \frac{\omega_{\text{max}} + \omega_{\text{min}}}{2} - \frac{\omega_{\text{max}} - \omega_{\text{min}}}{2} \text{sign} \frac{d\omega_1}{dt}\right), \quad (9)$$

де $0 < K_{\text{кор}} \leq 1$ – коефіцієнт врахування впливу додаткового насосу, що залежить від співвідношення потужностей основного і додаткового насосів; $U_{\text{рег}}$ – сигнал керування з виходу регулятора тиску.

Значення $\frac{d\omega_1}{dt}$ можна визначити опосередковано за струмом перетворювача частоти або використовувати значення $\text{sign} \frac{d\omega_1}{dt}$, в залежності від режиму роботи

перетворювача, а саме збільшує він вихідну частоту, чи зменшує.

Важливою особливістю складової корекції як масштабованої ступінчастої функції є те, що вона також буде скомпенсована інтегральною складовою регулятора після закінчення перехідного процесу.

Складемо математичну модель системи водопостачання з використанням регульованого і нерегульованого насосу в додатку Simulink середовища MATLAB. С метою якісного порівняння результатів роботи системи із різними типами регуляторів завдання за тиском формується у вигляді ступінчастого сигналу 6 бар в блоці Setpoint. Після закінчення перехідного процесу через 50 с після початку моделювання моделюється збільшення споживання води в системі, що має призвести до вмикання додаткового насосу. Через 150 с моделюється зменшення споживання, що має

призвести до вимикання додаткового насосу. Для регулювання швидкості основного насосу використовується класичний пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор), але із можливістю зміни коефіцієнту впливу режиму роботи додаткового насосу. Коефіцієнт впливу додаткового насосу встановлюється за допомогою блоку підсилення сигналу Correction в межах від 0 до 1. Вихідний сигнал U_1 обмежується за допомогою блоку Non_reverse для уникнення моделювання обертання регульованого насосу в зворотному напрямку. Логіка керування нерегульованим насосом реалізується за допомогою двопозиційного реле із гістерезисом. Отримана математична модель приймає вигляд, представлений на рис. 3.

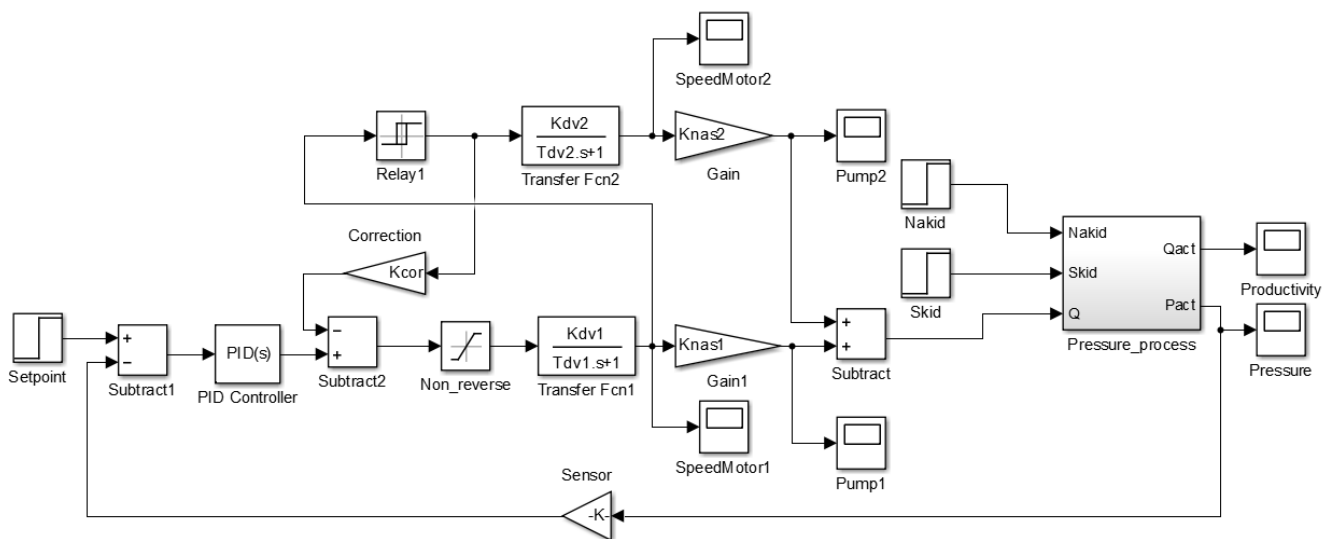


Рисунок 3 – Математична модель системи станції водопостачання із керуванням і некеруваннями насосами із вмиканням за зміною швидкості

Графік перехідного процесу за тиском при використанні ПІД-регулятора технологічного параметру представлений на рис. 4. Коефіцієнти регулятора налаштовані в блоці PID в програмному середовищі MATLAB за перехідною функцією.

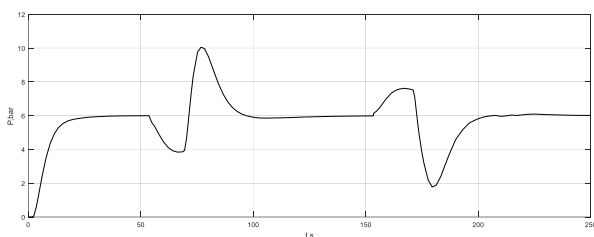


Рисунок 4 – Графік перехідного процесу за тиском при використанні ПІД-регулятора

Графік перехідного процесу за тиском при використанні ПІД-регулятора технологічного параметру, із додатковою складовою корекції за швидкістю нерегульованого насосу, представлений на

рис. 5. Коефіцієнти регулятора також налаштовані в середовищі MATLAB за перехідною функцією.

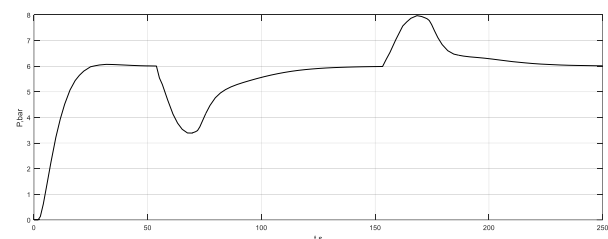


Рисунок 5 – Графік перехідного процесу за тиском при використанні ПІД-регулятора із корекцією

Слід відзначити, що в найгіршому випадку, коли вмикається додатковий насос, тиск в системі водопостачання може перевищити 10 бар, і, оскільки, зазвичай в житлових будинках встановлюються датчики з робочим діапазоном 0–10 бар, це може привести до виходу останнього з ладу. При використанні коригуючої складової перерегулювання

складає 33 %, що є допустимим, однак теж приводить до зниження надійності системи водопостачання в цілому.

Отже, для подальшого покращення якості перехідних процесів за тиском здійснимо процедуру синтезу нечіткого регулятора, додавши до нього коригуючу складову за впливом додаткового насосу. При цьому основною вимогою для компенсації керування у вигляді масштабованою ступінчастою функції при закінченні перехідного процесу є забезпечення астатизму в системі.

Для визначення коригуючого ланцюга ПІ – регулятора розглянемо двоканальний нечіткий регулятор. Як вхідний вплив використано помилку регулювання тиском e та її похідну r .

Функції належності нечітких множин (рис. 6) представлені такими виразами [9]:

$$\left. \begin{aligned} \mu_e^+ &= \frac{L+K_e \cdot e}{2L}, \mu_r^+ = \frac{L+K_r \cdot r}{2L} \text{ якщо } e > 0, r > 0; \\ \mu_e^- &= \frac{L-K_e \cdot e}{2L}, \mu_r^- = \frac{L-K_r \cdot r}{2L} \text{ якщо } e < 0, r < 0, \end{aligned} \right\} (10)$$

де K_e та K_r – вагові коефіцієнти; L – максимальне значення масштабованих помилок.

Вагові коефіцієнти приймаються такими, щоб виконувалась умова $K_e \cdot e = K_r \cdot r$.

Множини для визначення вихідного сигналу регулятора представлені трьома рівнобедреними трикутниками. Активні площі, що використовуються при дефазифікації, заштриховані і мають значення $S(\mu) = \mu \cdot H$, де H – координата центру тяжіння, ΔU – значення вихідного сигналу.

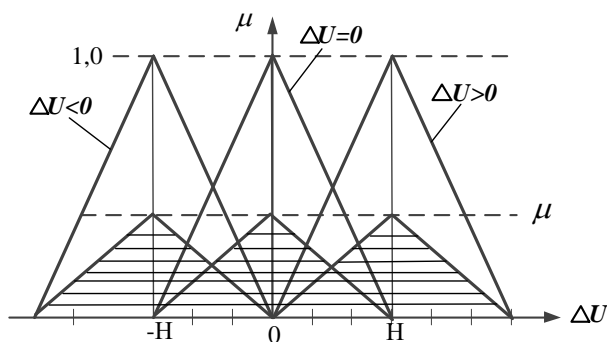


Рисунок 6 – Функції належності вихідного сигналу ΔU

Для того щоб помилка регулювання завжди прагнула до нуля за будь-яких значеннях e або r сигнал ΔU повинен приймати наступні значення:

$$\left. \begin{aligned} \text{якщо } e > 0, r > 0, \text{ то } \Delta U > 0; \\ \text{якщо } \begin{cases} e > 0, r < 0, \\ \text{або } e < 0, r > 0, \end{cases} \text{ то } \Delta U = 0; \\ \text{якщо } e < 0, r < 0, \text{ то } \Delta U < 0. \end{aligned} \right\} (11)$$

Величина ΔU визначається як координата центру тяжіння заштрихованих площ залежно від функції належності μ [10]. Згідно з наведеними правилами (11) можливі чотири варіанти співвідношення функції належності μ_i (табл.1).

Таблиця 1 – Варіанти співвідношення функції належності

μ_i	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4
μ_1	μ_e^+	μ_e^+	μ_r^+	μ_r^+
μ_2	μ_e^+	μ_e^-	μ_r^+	μ_r^-
μ_3	μ_r^+	μ_e^-	μ_r^+	μ_e^-
μ_4	μ_r^-	μ_r^-	μ_e^-	μ_e^-

Як приклад розглянемо четвертий варіант. Значення активних площ:

$$\left. \begin{aligned} S(\mu_1) &= H \frac{L+K_r \cdot r}{2L}; S(\mu_2) = H \frac{L-K_r \cdot r}{2L}; \\ S(\mu_3) &= H \frac{L-K_e \cdot e}{2L}; S(\mu_4) = H \frac{L-K_e \cdot e}{2L}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Координата центру тяжіння:

$$\Delta U = \frac{H \cdot S(\mu_1) + 0(S(\mu_2) + S(\mu_3)) - H \cdot S(\mu_4)}{S(\mu_1) + S(\mu_2) + S(\mu_3) + S(\mu_4)}. (13)$$

Підставивши в (13) значення площ з (12), отримаємо:

$$\Delta U = \frac{0,5H}{2L - K_e e} (K_e \cdot e + K_r \cdot r). (14)$$

Структурна схема залежності (14) представлена на рис. 7.

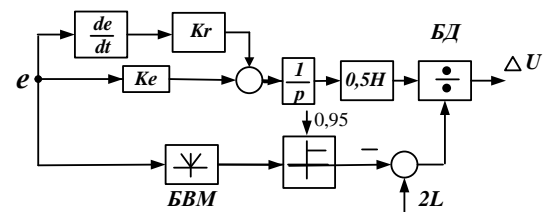


Рисунок 7 – Структурна схема нечіткого регулятора

Відповідно до цієї схеми, сигнал e є помилкою за тиском, а сигнал r – помилкою за швидкістю зміни тиску, що подаються на вхід інтегруючої ланки, що забезпечує астатизм системи регулювання технологічного параметру. При цьому фактично адаптивний регулятор є нелінійним ПІД-регулятором. Основна відмінність розробленого регулятора від звичайного полягає в наявності блоку ділення (БД) та

паралельного ланцюга з блоком виділення модуля (БВМ) сигналу.

Завдяки цій відмінності відбувається автоматична зміна коефіцієнта посилення сигналу, причому, чим більше помилка e , тим більше коефіцієнт посилення, а при зменшенні e зменшується і коефіцієнт посилення.

Графік перехідного процесу за тиском при використанні нечіткого регулятора технологічного параметру із складовою корекції за швидкістю нерегульованого насосу представлений на рис. 8.

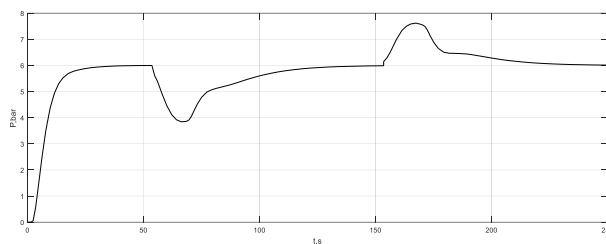


Рисунок 8 – Графік перехідного процесу за тиском при використанні нечіткого регулятора із корекцією

Слід відзначити, що при зміні гідравлічного опору в системі водопостачання відхилення від заданого значення не перевищує 30 %, що є кращим показником, ніж у випадку використання класичного ПД-регулятора із складовою корекції по швидкості додаткового насосу.

Висновки.

1. Використання опису впливу додаткового насосу у вигляді масштабованої ступінчастої функції дозволяє сформулювати аналітичний вираз для регулятора тиску в системі водопостачання, що може бути легко реалізований в мікропроцесорних пристроях.

2. Використання астатичного нечіткого регулятора дозволило забезпечити нульову статичну похибку при відпрацюванні перепадів тиску при наявності коригуючого сигналу залежності впливу роботи додаткового насосу.

3. Даний алгоритм керування дозволив значно підвищити якість регулювання тиску в системі водопостачання під час перехідних режимів вмикання/вимикання додаткового насосу.

Список літератури

1. Коренькова Т. В., Сердюк О. А., Ковальчук В. Г. Режими роботи насосних та вентиляторних установок із автоматизованим електроприводом: навчальний посібник. Кременчук: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, 2013. 200 с.
2. Чермалих О. В., Чермалих В. М., Майданський І. Я. Вибір раціональних систем автоматизованого управління компресорних станцій теплового насосу. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. 2012. № 50 (956). С. 107–116.
3. Печеник М. В., Бур'ян С. О., Худа І. В. Дослідження режимів роботи турбомеханізмів за використання каскадної схеми включення насосів. Вісник Вінницького Політехнічного Інституту. 2021. Т. 159, № 6. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-26-31>.

4. Соколовський О. Ф. Енергозбереження в багатоагрегатних насосних установках. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки». 2008. № 1 (44). С. 102–108. DOI: [https://doi.org/10.26642/tn-2008-1\(44\)-102-108](https://doi.org/10.26642/tn-2008-1(44)-102-108).
5. Торопов А. В., Торопова Л. В., Боднарук О. Ю. Квазіоптимальне нелінійне керування насосною станцією при стабілізації тиску. *Actual priorities of modern science, education and practice*: Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference, м. Париж, Франція, 29 берез. – 1 квіт. 2022 р. С. 858–862.
6. Ahn B. C., Mitchell J. W. Optimal control for central cooling plants. *Building Simulation 1999*: Proceedings of the 6th International IBPSA Conference, Kyoto, Japan, 13–15 September 1999.
7. Kiselychuk O., Koláčny, J., Buryan S., Ondrák T. Interactive energy saving automatic control of water supply pump. *Elektrorevue*. 2007. 24.
8. Toropov A. Suboptimal nonlinear control of armature current loop at direct torque control. *Electrotechnic and Computer Systems*. 2019. No. 9 (85). P. 24–28.
9. Kari T., Gao W., Zhao D. et al. An integrated method of ANFIS and Dempster-Shafer theory for fault diagnosis of power transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2018. Vol. 25, no. 1. P. 360–371. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2018.006746>.
10. Торопов А. В., Босак А. В. Нечітке керування електроприводом контура стабілізації зусилля різання за наявності збурень коливального характеру. *Технічна електродинаміка*. 2019. Т. 2019, № 4. С. 41–47. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.041>.

References

1. T. V. Korenkova, O. A. Serdiuk, and V. H. Kovalchuk, *Rezhymy Roboty Nاسوبnykh Ta Ventylyatorynykh Ustanovok Iz Avtomatyzovanykh Elektropryvodom [Operating Modes of Pump and Fan Units With Automated Electric Drive]*. Kremenchuk: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University, 2013. (in Russian)
2. O. V. Chermalykh, V. M. Chermalykh, and I. Y. Maidanskyi, “Rational choice systems control compressor station heat pump,” *Bulletin of the National Technical University «KhPI» Series: New Solutions in Modern Technologies*, no. 50 (956), p. 107–116, 2012. (in Russian)
3. M. V. Pechenyk, S. O. Buriian, and I. V. Khudia, “Research of operating modes of turbomechanisms when using an inclusion cascade pump switching scheme,” *Visnyk of Vinnytsia Politechnical Institute*, vol. 159, no. 6, p. 26–31, 2021, doi: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2021-159-6-26-31>. (in Ukrainian)
4. O. F. Sokolovskyyi, “Energy saving of multyaggregate pumps installations,” *The Journal of Zhytomyr State Technological University. Series: Engineering*, no. 1 (44), p. 102–108, 2008, doi: [https://doi.org/10.26642/tn-2008-1\(44\)-102-108](https://doi.org/10.26642/tn-2008-1(44)-102-108). (in Ukrainian)
5. A. V. Toropov, L. V. Toropova, and O. Yu. Bodnaruk, “Kvazioplymalne nelineiine keruvannya nasosnoiu stantsiieiu pry stabilizatsii tysku [Quasi-optimal nonlinear control of a pumping station for pressure stabilisation],” in *Actual Priorities of Modern Science, Education and Practice*, Paris, France, Mar. 29–Apr. 1, 2022. p. 858–862. (in Ukrainian)
6. B. C. Ahn and J. W. Mitchell, “Optimal control for central cooling plants,” in *Building Simulation 1999*, Kyoto, Japan, Sep. 13–15, 1999.
7. O. Kiselychuk, J. Koláčny, S. Buryan, and T. Ondrák, “Interactive energy saving automatic control of water supply pump,” *Elektrorevue*, Jun. 2007, Art. no. 24.
8. A. Toropov, “Suboptimal nonlinear control of armature current loop at direct torque control,” *Electrotechnic and Computer Systems*, no. 9 (85), p. 24–28, 2019.
9. T. Kari et al., “An integrated method of ANFIS and Dempster-Shafer theory for fault diagnosis of power transformer,” *IEEE Transactions*

on *Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, no. 1, p. 360–371, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2018.006746>.

10. A. V. Toropov and A. V. Bosak, “Fuzzy control of the electric drive of cutting force stabilization loop in presence of oscillation character disturbances,” *Tekhnichna elektrodynamika*, vol. 2019, no. 4, p. 41–

47, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.15407/technd2019.04.041>. (in Ukrainian)

Надійшла (received) 19.07.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Босак Алла Василівна (Alla Bosak) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0545-9980>; e-mail: allabosak@lil.kpi.ua.

Торопов Антон Валерійович (Anton Toropov) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», доцент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8505-0266>; e-mail: a.toropov@kpi.ua.

Дубовик Володимир Григорович (Volodymyr Dubovyk) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», старший викладач кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8884-8222>; e-mail: processor-w@ukr.net.

Торопова Лілія Володимирівна (Liliia Toropova) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», асистент кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6882-2295>; e-mail: toropova.liliia@lil.kpi.ua.

Боднарчук Олексій Юрійович (Oleksii Bodnaruk) – аспірант кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-3031-3644>; e-mail: oleks.bodn@gmail.com.