

УДК 004.942

В.О. ГАВРИЛЕНКО, С.О. РОЖКОВ
Херсонський національний технічний університет

ВИКОРИСТАННЯ НЕЧІТКИХ РЕГУЛЯТОРІВ ПРИ КЕРУВАННІ АВТОНОМНИМИ СИСТЕМАМИ ОПАЛЕННЯ

У статті розглянуто синтез нечіткого регулятора на основі методу кластеризації для твердопаливних систем індивідуального опалення. Синтез бази знань нечіткого регулятора виконано за алгоритмом Сугено.

Ключові слова: регулювання, система керування, температура, база знань, перехідний процес.

V.A. GAVRILENKO, S.A. ROZHKOVA
Kherson National Technical University

USING FUZZY CONTROLLERS IN CONTROL AUTONOMOUS HEATING SYSTEM

Abstract

The article deals with the synthesis of fuzzy controller based on clustering method for solid individual heating systems. Synthesis of the knowledge base of fuzzy controller accomplished by Sugeno algorithm.

Keywords: regulation, control system, temperature, knowledge base, the transition process.

Постановка проблеми

Постійне дорожчання традиційних видів енергії змушує виробників шукати альтернативні джерела енергії. Твердопаливні котли, як системи опалення, можуть бути орієнтовані на широкий спектр споживання: від побутового до промислового використання, при цьому, з точки зору забезпечення необхідних показників якості, вимоги до таких систем постійно підвищуються. Використання при опаленні регенераційних видів палива є досить безпечним для навколишнього середовища, оскільки така енергія є умовно поновлюваною і тенденція до його подорожчання не спостерігається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Відомо [1], що з метою мінімізації витрат на отримання теплової енергії для опалювання слід використовувати методи оптимального управління. В області розробки таких систем управління відомі роботи Григор'єва В.А., Зоріна В.М, Плетнева В.П., Ротача В.Я., Кокорева В.В., Букреєва В.Г., Сабініна В.Р., Смирнова Н.І, Бочкарева Е.Ю., Рєпіна В.І. та ін. [1-5]. Пошук найкращих алгоритмів та схемотехнічних рішень для проектування та реалізації систем управління автономною системою опалення призвів до використання нечітких законів управління, що спираються на теорію нечітких множин та нечіткої логіки [7].

Класичні ПІД-регулятори для формування сигналу управління використовують методи чисельного інтегрування і диференціювання вхідного сигналу. Проте у регуляторів з фіксованою структурою відсутня можливість обчислення сигналу управління з урахуванням нестационарності параметрів технологічного об'єкту [4, 5]. У зв'язку з цим, актуальним науково-технічним завданням є розробка математичних моделей і технічних засобів для автономних систем опалювання, які дозволять підвищити якість та ефективність управління теплоенергетичними системами даного класу.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є розробка нечіткого регулятора для теплового об'єкта – твердопаливного котла індивідуального опалювання. Твердопаливний котел є складним об'єктом з розподіленими параметрами, у якому транспортне запізнення обумовлене швидкістю розпалювання палива, його витратами, а інерційність – перепадом тиску в різних точках подачі повітря і відведення димових газів [5, 6].

Принципову і структурну схеми твердопаливного котла показано на рис. 1.

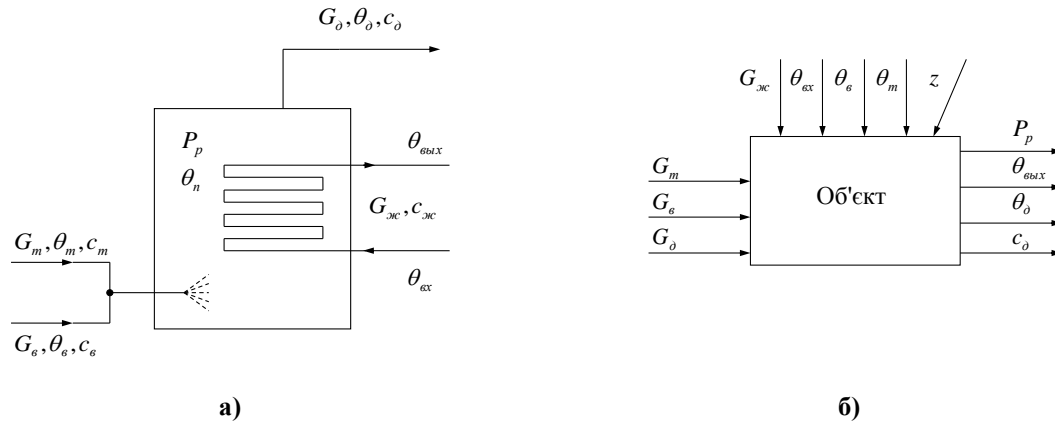


Рис. 1. Принципова (а) і структурна (б) схеми твердопаливного котла

Система рівнянь теплових балансів для твердопаливного котла згідно з [1]:

$$\begin{cases} W(s)_{G_e \rightarrow \theta_n} = \left(\frac{\partial \omega_{\theta n}}{\partial \theta_n} \right)^0 \text{ при } P_p \rightarrow \text{const} \\ \frac{d\theta_{mp}}{dt} = \frac{\alpha_n \cdot S_n}{m_{mp} \cdot c_{mp}} \cdot (\theta_n - \theta_{mp}) - \frac{\alpha_{жс} \cdot S_{жс}}{m_{mp} \cdot c_{mp}} \cdot (\theta_{mp} - \theta_{вых}) \\ \frac{d\theta_{вых}}{dt} = \frac{\alpha_{жс} \cdot S_{жс}}{m_{жс} \cdot c_{жс}} \cdot (\theta_{mp} - \theta_{вых}) - \frac{G_{жс} \cdot c_{жс} \cdot \rho_{жс}}{m_{жс} \cdot c_{жс}} \cdot (\theta_{вых} - \theta_{вх}) \end{cases} \quad (1)$$

Згідно з [3], система рівнянь матеріальних балансів твердопаливного котла:

$$\begin{cases} \frac{dG_e}{dt} = \left(\frac{\partial \omega_{\theta e}}{\partial P_e} \right)^0 \cdot \frac{S_e}{l_e} - \xi_e \cdot \frac{S_e}{l_e} \cdot G_e - \frac{S_e}{l_e} \cdot P_p \\ \frac{dG_d}{dt} = - \left(\frac{\partial \omega_{\theta d}}{\partial P_d} \right)^0 \cdot \frac{S_d}{l_d} - \xi_d \cdot \frac{S_d}{l_d} \cdot G_d + \frac{S_d}{l_d} \cdot P_p, \\ \frac{dP_p}{dt} = \frac{R \cdot \theta_d^0}{\mu_{CO_2} \cdot V_n} \cdot G_e - \frac{R \cdot \theta_d^0}{\mu_{CO_2} \cdot V_n} \cdot G_d \end{cases} \quad (2)$$

де θ_{mp} – температура труби; $m_{mp}, m_{жс}$ – маса металу трубної системи і рідини відповідно; $c_{mp}, c_{жс}$ – питома теплоємність металу труб і рідини відповідно; $\alpha_n, \alpha_{жс}$ – коефіцієнт тепловіддачі від пари до труби і від труби до рідини відповідно; $S_n, S_{жс}$ – площа теплообміну з боку пари і рідини відповідно; $\rho_{жс}$ – щільність рідини; S_e, S_d – площа поперечного перетину повітряної і газової ділянок відповідно; l_e, l_d – довжина повітряної і газової ділянок відповідно; $\omega_{\theta e}, \omega_{\theta d}, \omega_{\theta n}$ – швидкість обертання дугтьового вентилятора, димососа і двигуна подачі палива відповідно; P_e, P_d – тиск у повітряній і газовій ділянці відповідно; ξ_e, ξ_d – коефіцієнти аеродинамічного опору на повітряній і газовій ділянці відповідно; μ_{CO_2} – молярна маса газу для CO_2 ; V_n – об'єм камери згорання; R – універсальна газова постійна; θ_d^0 – температура димових газів у сталому режимі; $G_m, G_e, G_d, G_{жс}$ – витрати палива, повітря, димових газів, теплоносія відповідно; $c_m, c_e, c_d, c_{жс}$ – теплоємність речовин відповідно; $\theta_m, \theta_e, \theta_d$ – температури речовин відповідно; $\theta_{вх}, \theta_{вых}$ – температура вхідного і вихідного теплоносія; θ_n – температура в камері згорання; P_p – розрядження у камері згорання.

Структурну схему управління температурою теплоносія відображено на рис. 2.

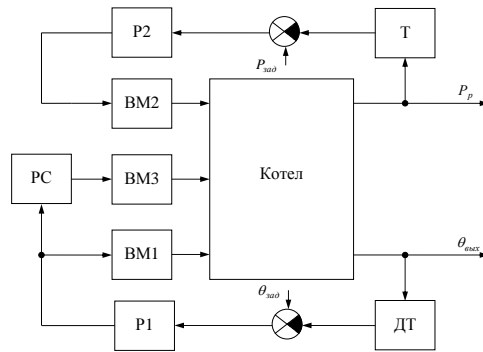


Рис. 2. Структура системи регулювання температури у приміщенні: P1, P2 – регулятор; PC – регулятор співвідношення; BM1, BM2, BM2 – виконавчі механізми подачі палива, відведення димових газів і підвода повітря відповідно; Т – датчик тиску; ДТ – датчик температури; $\theta_{вих}$, P_p – вихідні температура у кімнаті і розрядження в топці; $\theta_{зад}$, $P_{зад}$ – задані значення температури у кімнаті і розрядки в топці котла

Дана система регулювання температури функціонує таким чином. У топку твердопаливного котла [4] періодично подається паливо (паливні гранули, пелети) і повітря у співвідношенні $\gamma = \frac{G_g}{G_m} = const$.

У процесі згоряння виділяється тепло, яке з димовими газами передається в теплообмінник. У камері згоряння (топці) виникає розрядження, для підтримки якого в межах 10-30 Па використовується регулятор 2 (P2). P2 регулює витрату димових газів. У теплообміннику нагрівається теплоносія (вода), який подається в систему опалювання житлового будинку. Для регулювання температури теплоносія використаний регулятор 1 (P1).

Синтез нечіткого регулятора виконаний на підставі кластеризації даних, де об'єднання об'єктів в групи (кластери) виконують на основі схожості ознак для об'єктів однієї групи і відмінностей між групами [9]. Алгоритми кластеризації можуть ґрунтуватися як на евристичних, так і на формальних статистичних підходах. Найбільшого поширення і практичного застосування набули алгоритми кластерного аналізу К-середніх та їх нечіткої адаптації, алгоритм С-середніх. Дані алгоритми мають хорошу швидкість збіжності, але вони не гарантують виділення яких-небудь структурних особливостей, коли дані не є добре розділеними.

Алгоритм нечітких вершин С-середніх [6] реалізується таким чином. Встановлюють параметри алгоритму: c – кількість кластерів; m – експоненціальна вага; ε – параметр зупинки алгоритму. Далі випадковим чином формується матриця нечіткого розбиття F , що задовольняє умовам:

$$\sum_{i=1, c} \mu_{ki} = 1, \quad k = \overline{1, M}, \quad (3)$$

$$0 < \sum_{k=1, M} \mu_{ki} < N, \quad i = \overline{1, c}. \quad (4)$$

Розраховують центри кластерів

$$V_i = \frac{\sum_{k=1, N} (\mu_{ki})^m \cdot X_k}{\sum_{k=1, N} (\mu_{ki})^m}, \quad i = \overline{1, c}, \quad (5)$$

де X – матриця спостереження.

Потім розраховують відстані між об'єктами з X і центрами кластерів:

$$D_{ki} = \sqrt{\|X_k - V_i\|^2}, \quad k = \overline{1, M}, \quad i = \overline{1, c}. \quad (6)$$

Далі перераховують елементи матриці нечіткого розбиття ($k = \overline{1, M}, i = \overline{1, c}$): якщо $D_{ki} > 0$

$$\mu_{ki} = \frac{1}{\left(D_{ik}^2 \cdot \sum_{j=1, c} \frac{1}{D_{jk}^2} \right)^{\frac{1}{m-1}}}; \tag{7}$$

якщо $D_{ki} = 0$,

$$\mu_{kj} = \begin{cases} 1, & j = i \\ 0, & j \neq i, j = \overline{1, c}. \end{cases} \tag{8}$$

Перевіряють умову:

$$\|F - F^*\|^2 < \varepsilon, \tag{9}$$

де F^* – матриця нечіткого розбиття на попередній ітерації алгоритму. Якщо «ні», то перейти до (5).

Після збору даних, згідно представленому алгоритму С-середніх вершин, виконується синтез бази знань нечіткого регулятора за алгоритмом Сугено [6, 9]. Нечіткий регулятор Такагі-Сугено є компактною системою управління, яка описує механізм логічного виводу з меншими обчислювальними витратами (у 50-100 разів швидше, ніж існуючі алгоритми) на реалізацію самого алгоритму логічного виводу.

Досить складно правильно вибрати кількість кластерів для реальних завдань без якої-небудь апріорної інформації про структури в дані, тому важливим параметром у приведеному алгоритмі є кількість кластерів c . Для реалізації системи регулювання твердопаливним котлом на основі нечіткої логіки система проектується безпосередньою з вчителем – ПД-регулятором.

На основі методу синтезу кластеризації даних отримано результати функцій належності по каналу «температура у камері згорання – вихідна температура теплоносія» та по каналу «швидкість обертання димососа – розрядження», які зображені на рис. 3.

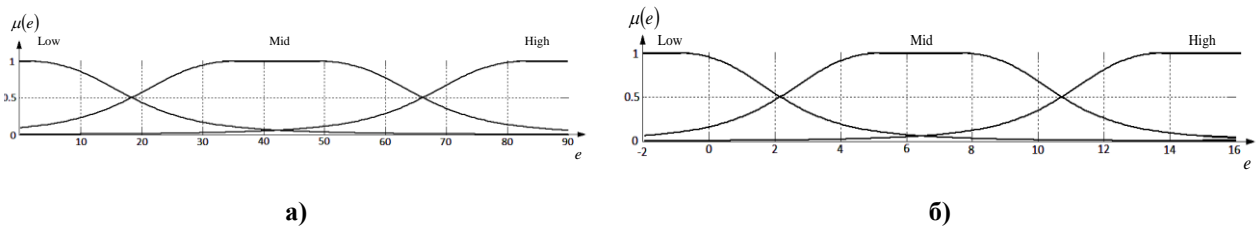
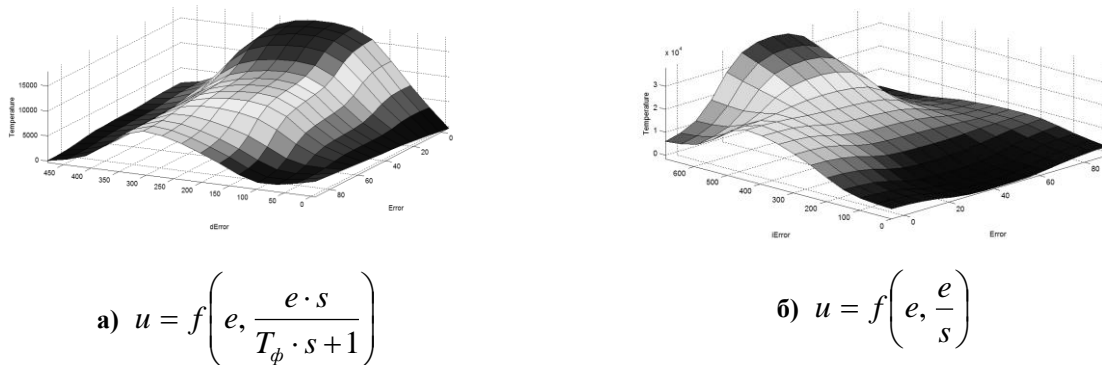


Рис. 3. Функції належності через помилку: а) за температурою; б) за тиском

Поверхні за каналом «температура у камері згорання – вихідна температура теплоносія» відображені на рис. 4, поверхні за каналом «швидкість обертання димососа – розрядження» показано на рис. 5.



$$a) u = f\left(e, \frac{e \cdot s}{T_{\phi} \cdot s + 1}\right)$$

$$b) u = f\left(e, \frac{e}{s}\right)$$

Рис. 4. Поверхні за каналом «температура у камері згорання – вихідна температура теплоносія»

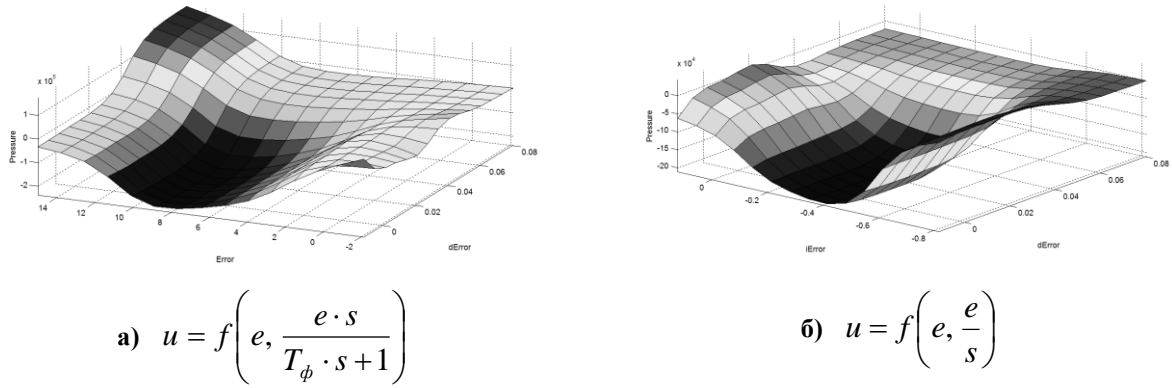


Рис. 5. Поверхні за каналом «швидкість обертання димососа – розрядження»

На вхід моделі подаються сигнали кількості оборотів двигунів витрати повітря (W_v) і двигуна витрати димових газів (W_d). Виконавчі механізми представлені у вигляді блоків Motor Fuel – двигун витрати палива і Motor Air – двигун витрати повітря. У моделі не використовується регулятор співвідношення, який забезпечує постійне співвідношення повітря і палива, тому у блоці « $W_t \rightarrow T_r$ » врахований коефіцієнт γ . Цей блок представляє залежність між витратою палива і температурою у камері згорання.

Модель твердопаливного котла на основі регулятора нечіткої логіки у програмі MATLAB\SIMULINK показано на рис. 6 [10].

Управління за каналом «температура у камері згорання – вихідна температура теплоносія» представлено у вигляді блоку «Boiler - Temperature». Управління за каналом «швидкість обертання димососа – розрядження» представлено блоком «Boiler - Pressure».

Результати моделювання зображені на рис. 7 і рис. 8.

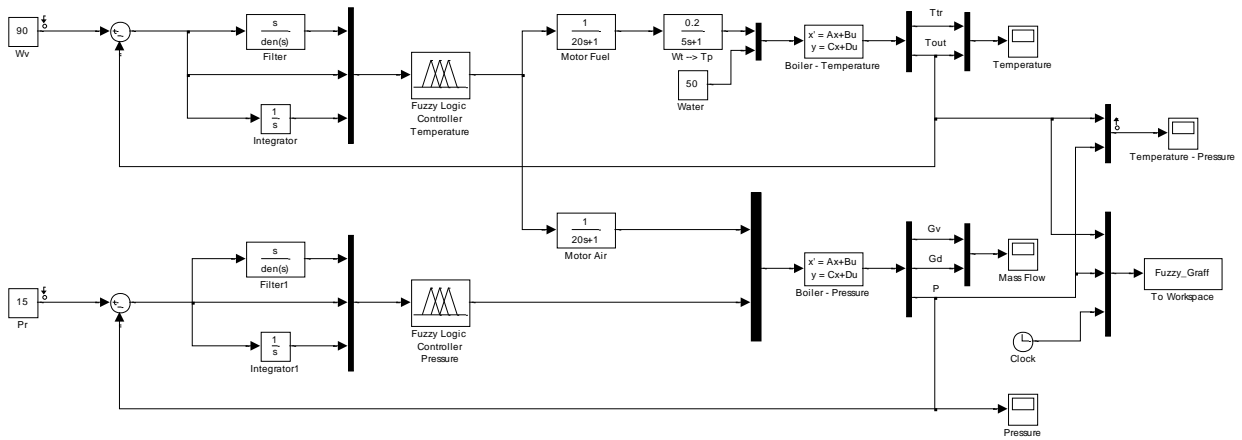


Рис. 6. Модель твердопаливного котла з регулятором нечіткої логіки (РНЛ)

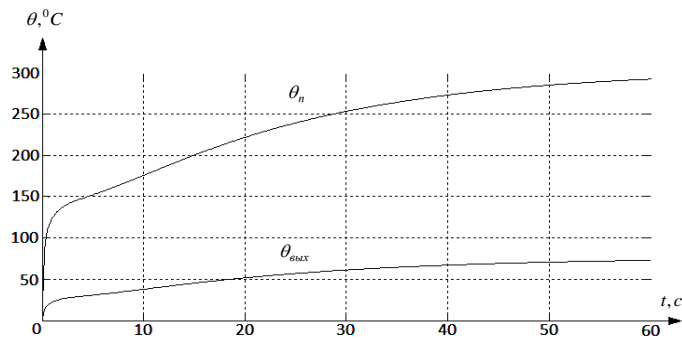


Рис. 7. Перехідна характеристика зміни температури теплоносія

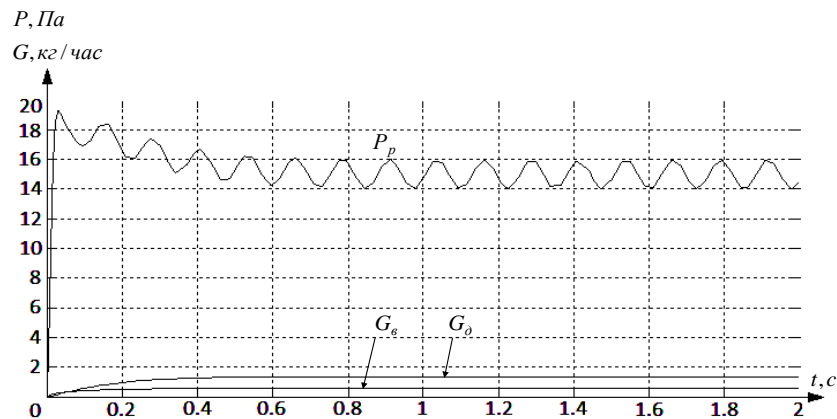


Рис. 8. Перехідна характеристика зміни розрядки

Результати моделювання представлені на рис. 9 і рис. 10.

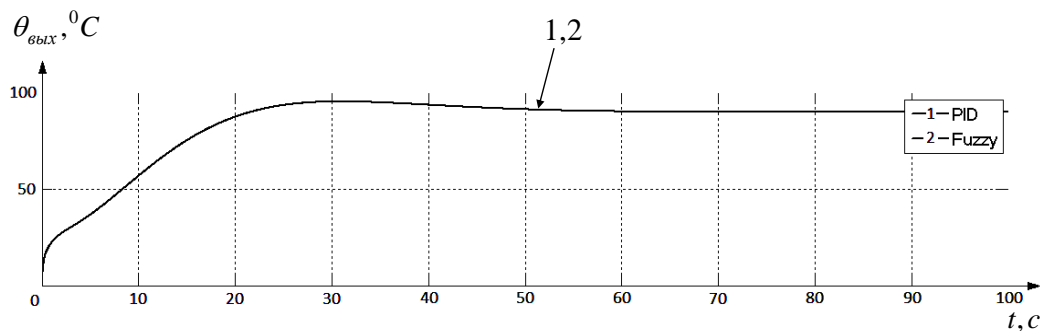


Рис. 9. Перехідні характеристики по каналу «температура у камері згорання – вихідна температура теплоносія»

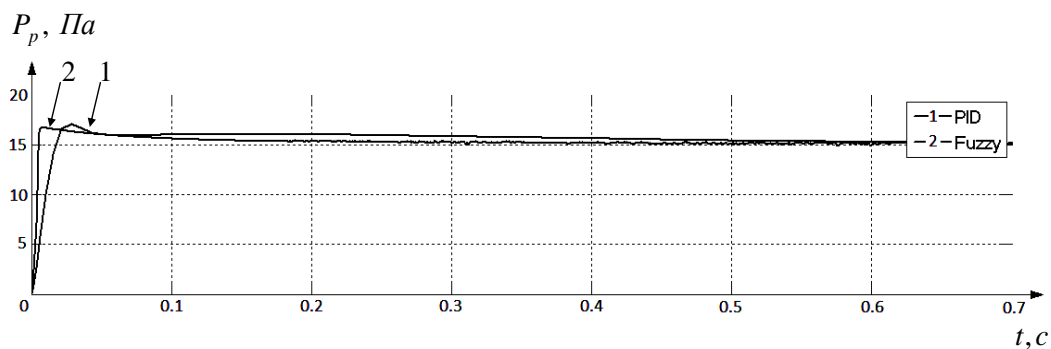


Рис. 10. Перехідні характеристики по каналу «швидкість обертання димососа - розрядження»

Висновки

Аналіз результатів моделювання класичного ПІД-регулятора і регулятора на нечіткій логіці показав, що при малій інерційності об'єкта управління обидва регулятора працюють ідентично. У разі змінення інерційності об'єкта управління регулятор з нечіткою логікою володіє кращими показниками якості.

ПІД – регулятор з нечіткою логікою для автономної системи опалення розроблений на основі методу кластеризації за алгоритмом нечітких С – середніх вершин. Слід враховувати, що нечіткий регулятор можна налаштовувати на заданий вид нелінійності, що дозволяє ефективно коригувати якісні показники управління при використанні даного типу регулятора на реальному об'єкті.

Список використаної літератури

1. Григорьев В.А. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: Справочник / В.А. Григорьев, В.М. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 552 с.
2. Бодянский Е.В. Интеллектуальное управление технологическими процессами (ферросплавное производство): Монография / Е.В. Бодянский, Е.И. Кучеренко, А.И. Михалёв, В.А.Филатов и др. Под ред. А.И.Михалёва –Днепропетровск: Национальная металлургическая академия України, 2013. –213 с.
3. Пономарев А.А. Модель газовоздушного тракта теплоэнергетического котла как объекта регулирования / А.А. Пономарев // Сборник научных трудов НГТУ. – 2010. – №3(61). – С.19-28.
4. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: Учебник для вузов / В.Я. Ротач. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: МЭИ, 2004. – 400 с.
5. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования / В.Я. Ротач. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
6. Васильев В.И. Интеллектуальные системы управления. Теория и практика: Учебное пособие / В.И. Васильев, Б.Г. Ильясов. – М.:Радиотехника, 2009. – 392 с.
7. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. Под ред. Н.Н. Моисеева и С.А. Орловского. Пер. с англ. Н.И. Ринго. – М.: Мир, 1976. – 166 с.
8. Плетнев Г.П. Автоматизированное управление объектами тепловых электростанций / Г.П. Плетнев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
9. Бураков М.В. Нечеткие регуляторы: Учебное пособие / М.В. Бураков. – СПб.: ГУАП, 2010. – 238 с.
10. Соловьев В.А. Искусственный интеллект в задачах управления. Интеллектуальные системы управления технологическими процессами / В.А. Соловьев, С.П. Черный. – Владивосток: Дальнаука, 2010. – 267 с.