

УДК 681.51:681

DOI: 10.15593/2224-9397/2020.3.04

Ю.Н. Хижняков, В.С. Никулин, С.А. СторожевПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

АДАПТИВНЫЙ НЕЧЕТКИЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ УРОВНЕМ НЕФТИ-СЫРЦА В СЕПАРАТОРЕ ДОЖИМНОЙ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ

Управление режимами работы дожимной насосной станции (ДНС) традиционно связано с применением ПИД-регуляторов. Однако неопределенность характеристик объекта, нелинейность объекта и возмущения, связанные с непрерывным изменением подачи нефти, приводят к колебаниям расхода и давления как в трубопроводе, так и на ЦПС. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является использование интеллектуальных систем. Непрерывное изменение подачи нефти, изменение физико-химического состава нефти, температуры окружающей среды и т.д. приводят к неопределенности в управлении уровнем жидкости в сепараторе с помощью ПИД-регулятора. В данном случае целесообразно использовать адаптивный нечеткий регулятор уровня жидкости в сепараторе. **Цель исследования:** разработка адаптивного нечеткого регулятора уровня нефти-сырца в сепараторе. **Методы:** разработка математической модели автоматического управления уровнем жидкости в сепараторе, разработка архитектуры нечеткого регулятора, применение в адаптивном фаззификаторе сигмоидальных функций принадлежности с коррекцией степеней принадлежности методом последовательного обучения, применение уравнений Сугено в блоке нечеткого вывода. **Результаты:** на базе разработанного адаптивного нечеткого регулятора уровня повысилась точность поддержания уровня при существующих неопределенностях. Разработанная математическая модель сепаратора подтвердила применение нечеткого управления для решения поставленной задачи. Точность поддержания уровня нефти-сырца в сепараторе удовлетворяет заданным требованиям. **Практическая значимость:** результаты исследований использованы при разработке адаптивного нечеткого регулятора уровня для управления оттоком нефти-сырца из сепаратора, что устранило аварийные ситуации при эксплуатации сепаратора в режиме переменного притока нефти-сырца от качалок.

Ключевые слова: нефтегазовый сепаратор, адаптивный нечеткий регулятор, уравнение Сугено.

Yu.N. Khizhnyakov, V.S. Nikulin, S.A. Storozhev

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ADAPTIVE FUZZY APPROACH TO CONTROLLING THE LEVEL OF CRUDE OIL IN THE SEPARATOR OF A BOOSTER PUMPING STATION

The control of the operating modes of the booster pump station (BPS) is traditionally associated with the use of PID controllers. However, the uncertainty of the characteristics of the object, the nonlinearity of the object and the disturbances associated with a continuous change in the oil supply lead to fluctuations in flow and pressure in the pipeline and on the central control center. One of the effective ways to solve this problem is the use of intelligent systems. Continuous change in oil supply, change in the physicochemical composition of oil, ambient temperature, etc. leads to uncertainty in controlling the liquid level in the separator using a PID controller. In this case, it is advisable to use an adaptive fuzzy fluid level controller in the separator. **Purpose:** to develop an adaptive fuzzy regulator of the level of crude oil in the separator. **Methods:** development of a mathematical model of automatic control of the liquid level in the separator, development of the architecture of a fuzzy controller, the use of sigmoidal membership functions in the adaptive fuzzifier with the correction of membership degrees by the method of sequential training, the use of Sugeno equations in a fuzzy inference block. **Results:** on the basis of the developed adaptive fuzzy level controller, the accuracy of maintaining the level with existing uncertainties has increased. The developed mathematical model of the separator confirmed the use of fuzzy control to solve the problem. The accuracy of maintaining the level of crude oil in the separator meets the specified requirements. **Practical relevance:** the research results were used to develop an adaptive fuzzy level controller for controlling the outflow of crude oil from the separator, which eliminated emergency situations when the separator was operated in the mode of variable inflow of crude oil from the rocking chair.

Keywords: Oil and gas separator, adaptive fuzzy controller, Sugeno equations.

Применение дожимных насосных станций (ДНС) на месторождении является необходимым вследствие наличия примесей серы, пластовой воды и попутных газов в добываемой нефти. ДНС обеспечивает сбор, сепарацию, предварительное обезвоживание пластовой воды и газа от скважин, а также учет и транспортировку нефти и газа до центрального пункта сбора. Непрерывное изменение подачи нефти приводит к колебаниям расхода и давления, как в трубопроводе, так и на центральном пункте сбора. Это связано с изменением физико-химического состава нефти, температуры окружающей среды, геологических и рельефных характеристиках местности, цикличностью работы и производительностью скважин.

Управление режимами работы дожимной насосной станции (ДНС) связано с применением ПИД-регуляторов [1, 2]. Однако неопределенность характеристик объекта, нелинейность объекта

и возмущения, связанные с непрерывным изменением подачи нефти, приводят к колебаниям расхода и давления, как в трубопроводе, так и на центральном пункте сбора (ЦПС). Сырьем для ДНС является продукция скважин (качалок) нефтяных месторождений в виде газожидкостной смеси, которая с кустов (скважин) подается на нефтегазовые сепараторы (НГС). В НГС происходит разделение (сепарирование) газожидкостной смеси на отдельные фазы (нефть, газ, вода и удаление механических примесей), а также дополнительно обеспечивается дожимной напор в трубопроводе для транспортировки готового продукта на ЦПС. Газ в дальнейшем поступает на узел учета газоперерабатывающего завода. Жидкая продукция поступает в резервуар предварительного обезвоживания (РПО) для обезвоживания и обессоливания нефти. Пластовая вода поступает на узел учета воды и затем в систему поддержания пластового давления. Далее нефть поступает в резервуары временного содержания (РВС), а затем насосами откачивается на узел учета нефти центрального пункта сбора (ЦПС) [1–5].

В качестве объекта управления принят НГС горизонтального типа, эскиз которого представлен на рис. 1. НГС относится к классу недетерминированных объектов, что объясняется нелинейностью поперечного сечения конструкции. Исходя из нелинейности статической характеристики НГС, заполнение его происходит по нелинейному закону, что необходимо учесть при проектировании регулятора уровня.

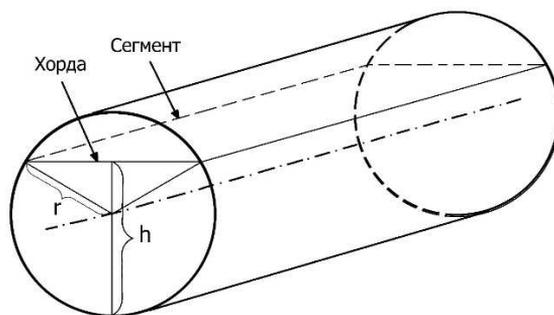


Рис. 1. Эскиз нефтегазового сепаратора

Объем жидкости, находящейся в сепараторе, определяется по формуле:

$$V_{\text{ж}} = l \left(r^2 \cdot \arccos \left(1 - \frac{h}{r} \right) - (r - h) \sqrt{2rh - h^2} \right), \quad (1)$$

где l – длина нефтегазового сепаратора, r – внутренний радиус корпуса нефтегазового сепаратора, h – уровень жидкости в нефтегазовом сепараторе.

Основная функция регулятора – стабилизация уровня жидкости в сепараторе. Для этого необходимо рассчитать нелинейную статическую характеристику сепаратора.

Согласно рис. 1 в системе моделирования MatLab была создана модель нефтегазового сепаратора горизонтального типа, которая рассчитывает статическую нелинейную характеристику уровня жидкости. Результат работы представлен на рис. 2.

Для того чтобы можно было исследовать динамику объекта, необходимо выполнить условие, при котором сепаратор должен быть заполнен жидкостью выше середины.

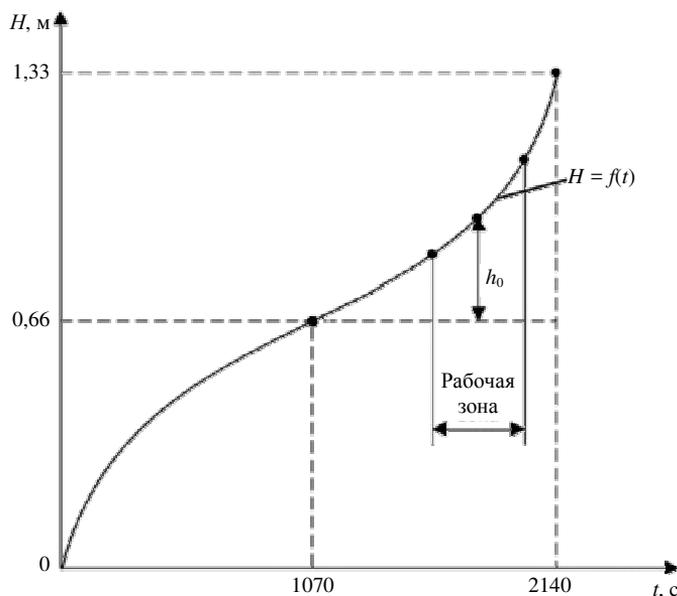


Рис. 2. Статическая нелинейная характеристика уровня жидкости нефтегазового сепаратора

1. Разработка математической модели автоматического управления уровнем жидкости в сепараторе. НГС представляет из себя нелинейный объект в виде цилиндра, в который поступает жидкость, где его статическая нелинейная характеристика изображена (см. рис. 2). Однако в процессе регулирования необходимо, чтобы уровень жидкости поддерживался в определенных пределах. Задаем

в рабочей зоне на нелинейной статической характеристике точкой, динамика поведения системы в которой описывается звеном третьего порядка с отрицательными корнями:

$$T_2 T_3 \frac{d^3 y(t)}{dt^3} + (T_1 T_3 + T_2 T_3 + T_1 T_2) \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + (T_1 + T_2 + T_3) \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t). \quad (2)$$

Передаточная функция модели объекта управления представлена в виде:

$$W(p) = \frac{k}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)}. \quad (3)$$

Для определения параметров модели объекта используется повторное интегрирование уравнения (2) с применением численного интегрирования [6, 7].

Таким образом, модель, описывается дифференциальным уравнением третьего порядка:

$$a_1 \frac{d^3 T(t)}{dt^3} + a_2 \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + a_3 \frac{dT(t)}{dt} + a_4 T(t) = u(t), \quad (4)$$

где начальные условия заданы в виде:

$$\frac{d^3 T(0)}{dt^3} = 0; \quad \frac{d^2 T(0)}{dt^2} = 0; \quad \frac{dT(0)}{dt} = 0; \quad T(0) = 0.$$

Согласно данному методу, необходимо проинтегрировать уравнение (4) три раза на интервале $t \in [0 \dots t]$. В итоге получено уравнение (5), содержащее лишь функцию $T(t)$ и интегралы от нее:

$$a_1 T(t) + a_2 \int_0^t T(t) dt' + a_3 \int_0^t \left(\int_0^t T(t) dt' \right) dt'' + a_4 \int_0^t \left(\int_0^t \left(\int_0^t T(t) dt' \right) dt'' \right) dt''' = \int_0^t \left(\int_0^t \left(\int_0^t u(t) dt' \right) dt'' \right) dt'''. \quad (5)$$

Предположим, что детерминированная переменная $T(t)$ заменена в интеграле стохастическими наблюдениями, а для параметра времени выбран ряд различных значений t_1, t_2, \dots, t_n , где n больше числа пара-

метров, которые нужно оценить. Получается переопределенная система, которую можно разрешить относительно оценок параметров методом наименьших квадратов [7]. Для этого необходимо разбить график статической нелинейной характеристики объекта управления, представленного на рис. 2, на 50 равных промежутков и найти значения в каждой точке.

Воспользовавшись результатами экспериментов, оценим параметры дифференциального уравнения (4): a_1, a_2, a_3, a_4 .

В ходе расчетов были определены значения, полученные при идентификации объекта: $a_1 = 11$; $a_2 = 0.69$; $a_3 = 16$ и $a_4 = 1$. Подставим эти значения и рассмотрим дифференциальное уравнение третьего порядка:

$$11 \frac{d^3 T(t)}{dt^3} + 0,69 \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + 16 \frac{dT(t)}{dt} + 1 \cdot T(t) = u(t). \quad (6)$$

Тогда передаточная функция модели объекта управления имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{11p^3 + 0,69p^2 + 16p + 1}.$$

Приведем передаточную функцию объекта к виду:

$$W(p) = \frac{1}{11p^3 + 0,69p^2 + 16p}. \quad (7)$$

Промоделируем преобразованный объект управления с добавленной отрицательной обратной связью [8–10]. На рис. 3 показана схема, на рис. 4 – результат работы звена третьего порядка, представляющий преобразованный объект управления.

На рис. 4. приведены графики работы математического и экспериментального моделирования.

Исходя из сравнительных характеристик, можно сделать вывод о том, что математическая модель лишь частично совпадает с экспериментальной. Однако, учитывая, что колебательный процесс двух графиков в десятипроцентной зоне совпадает, а поддержание уровня жидкости, находящегося между двумя датчиками, образующими рабочую зону, является приоритетной задачей, то станет очевидным, что объект управления подобран корректно и его можно использовать для моделирования системы автоматического управления.

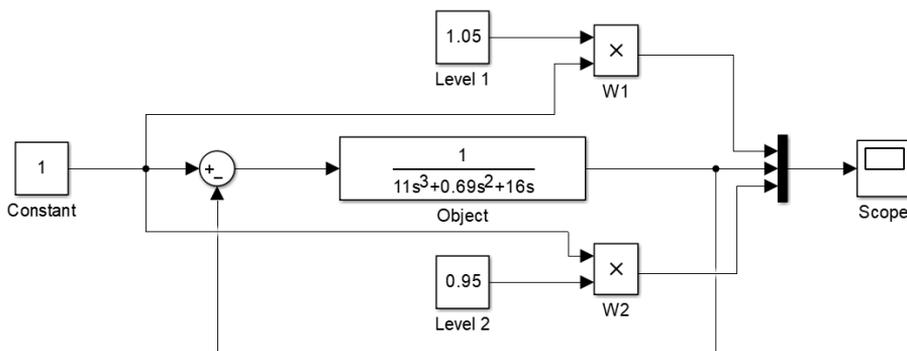


Рис. 3. Схема преобразованного объекта управления с отрицательной обратной связью и без регулятора в среде моделирования MatLab

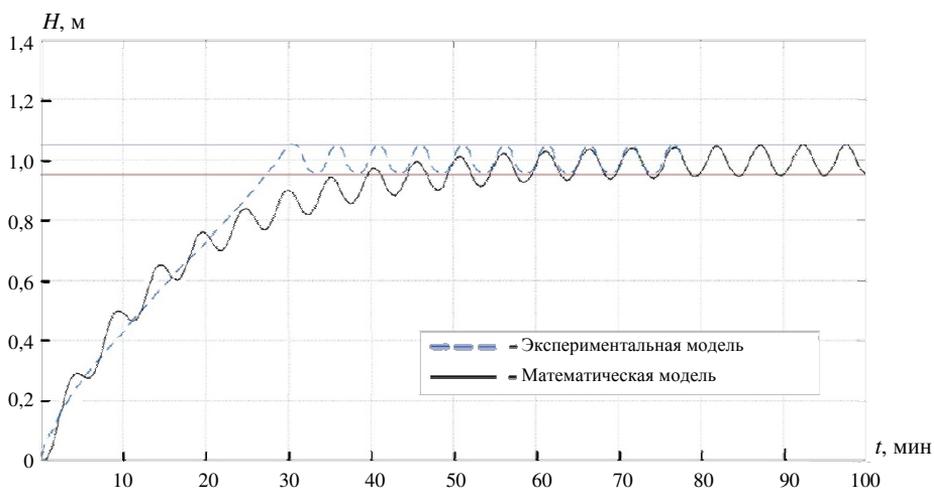


Рис. 4. Сравнительные характеристики экспериментальной и математической модели

2. Разработка адаптивного нечеткого регулятора. Необходимо разработать систему стабилизации уровня в сепараторе на базе адаптивного нечеткого регулятора с применением ультразвукового датчика. При разработке адаптивного нечеткого регулятора уровня в качестве лингвистических переменных приняты отклонение уровня от заданного значения и угол поворота вентиля оттока для спуска нефти-сырца. Нечеткий регулятор содержит адаптивный фаззификатор с применением двух сигмоидальных функций и дефаззификатор с применением двух унимодальных функций принадлежности, его структурная схема представлена на рис. 5.

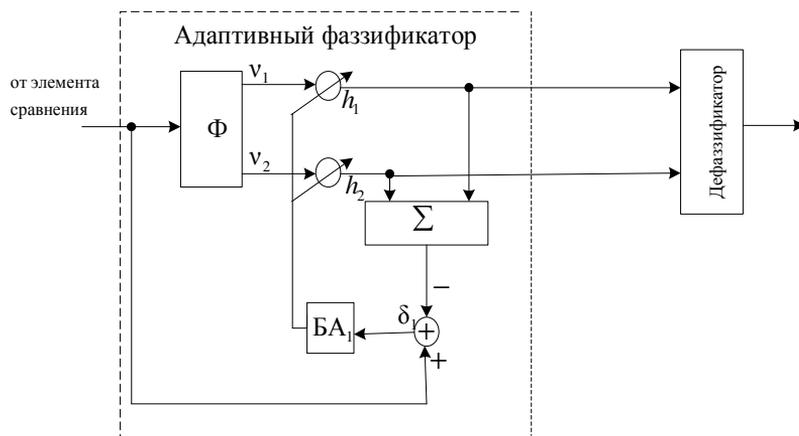


Рис. 5. Структурная схема адаптивного нечеткого регулятора

Текущее значение отклонения (лингвистическая переменная) управляет синглтоном. Степени принадлежности с выхода фаззификатора перемножаются с коэффициентами, которые изменяются с помощью рекуррентной формулы метода последовательного обучения [11–13]:

$$h_{j+1} = h_j + (x_j - x_{ju}) \frac{u_j}{u_j^T u_j}, \quad (7)$$

где h_{j+1} – последующий шаг $j+1$ – итерации, h_j – предыдущий шаг j -итерации, x_j – дискретная форма j -итерации, x_{ju} – сигнал отклонения с выхода сумматора, u_j – измеряемая функция, T – транспонирование.

Зададимся описанием лингвистических переменных: $\text{Level} \in \Delta h_1$, Δh_1 – нелинейное терм-множество отклонения текущего уровня жидкости от требуемого: низкий (L) и высокий (H). Аналитическое выражение сигмоидальных функций (терм) имеет вид [13]:

$$L(\Delta h_1) = \frac{1}{1 + e^{-b_1(\Delta h_1 - C_1)}}; \quad H(\Delta h_1) = \frac{1}{1 + e^{-b_2(\Delta h_1 - C_1)}}; \quad L(\Delta h_1) + H(\Delta h_1) = 1,$$

где C_1 – заданное значение уровня жидкости в сепараторе; Δh_1 – текущий уровень жидкости в сепараторе; b_1 и b_2 – коэффициенты, задающие крутизну сигмоидальных функций, где $b_1 \geq 0$, а $b_2 \leq 0$.

Задаем базу знаний (БЗ). В нашем случае база знаний сформирована на основе экспертных данных. Таким образом, составленная БЗ содержит следующие правила [14, 15]:

Π_1 : если $Level = L$, то $y = UP$; Π_1 : если $Level = H$, то $y = DOWN$.

Нечеткий регулятор на основе функций принадлежности определяет, включать привод спуска нефти-сырца – fail или не включать – grow. В выбранном алгоритме Сугено нечеткий вывод представлен не в виде терм-множества функции принадлежности лингвистической переменной выхода, а в виде унимодальных функций принадлежности [17]:

$$y_1 = UP = 0,73 \cdot Level - 0,000317, \quad y_2 = DOWN = 0,73 \cdot Level - 0,00029.$$

На этапе дефаззификации необходимо привести нечеткие данные к четкому виду. Зная «индивидуальные» выходы, необходимо рассчитать значение y по одной из формул метода центраида [13–20]:

$$y = \frac{\sum_{k=1}^N a_k y_k}{\sum_{k=1}^N a_k}. \quad (8)$$

В дополнение к этому оценим эффективность работы регулятора по целевой функции, которая высчитывается по формуле [19]:

$$F = 0,5 \cdot t_{n.n} + 0,5 \cdot \sigma\% = 30,4, \quad (9)$$

где $t_{n.n}$ – время переходного процесса, $t_{n.n} = 60,8$; $\sigma\%$ – перерегулирование, $\sigma\% = 0$.

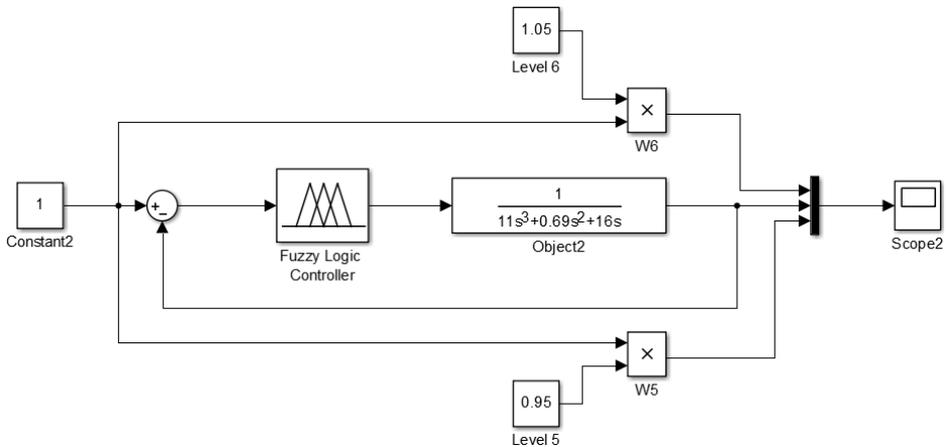


Рис. 6. Схема САУ с адаптивным нечетким регулятором в среде моделирования MatLab

По ранее разработанной модели объекта выполним моделирование САУ с адаптивным нечетким регулятором на платформе MatLab, как показано на рис. 6.

На рис. 7 представлен результат работы САР с адаптивным нечетким регулятором, у которого вход представлен отклонением текущего уровня жидкости от требуемого. Определим параметры системы: $\sigma\% = 0,9\%$; $t_{п.п} = 74,71$ с. Из осциллограммы следует, что САР с неадаптивным нечетким регулятором в итоге устанавливает уровень на заданном значении.

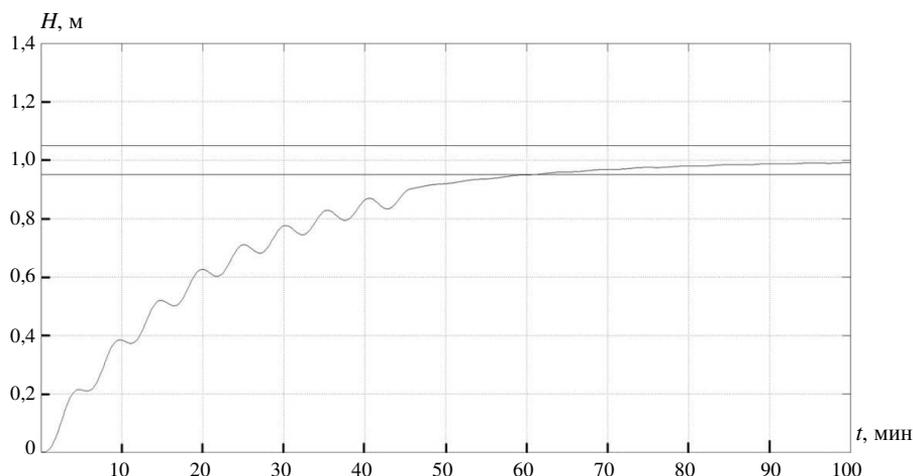


Рис. 7. Осциллограмма работы САР с адаптивным нечетким регулятором в среде моделирования MatLab

Определим параметры переходного процесса по управлению: $\sigma\% = 0$; $t_{п.п} = 60,88$ с.

Выводы. Выполнено математическое описание нелинейного объекта (сепаратора):

1. Приведена методика построения математической модели объекта.
2. Выполнено проектирование адаптивного нечеткого регулятора.
3. Исследована динамика работы САР поддержания уровня нефти-сырца в сепараторе с применением адаптивного нечеткого регулятора.
4. Практическая значимость рассматриваемого предложения обусловлена точностью поддержания заданного уровня в условиях неопределенности, что позволяет заменить ПИД-регулятор на адаптивный нечеткий регулятор.

Библиографический список

1. Байков Н.М., Позднышев Г.Н., Мансуров Р.И. Сбор и промышленная подготовка нефти, газа и воды. – М.: Недра, 1981. – 261 с.

2. Лутошкин Г.С. Сбор и подготовка нефти, газа и воды. – М.: Недра, 1977. – 192 с.
3. Сагдатуллин А.М. Анализ подходов к построению систем нефтегазодобывающего предприятия // Ползуновский вестник. – 2013. – № 4–2. – С. 78–83.
4. Сагдатуллин А.М. Повышение эффективности управления системой транспорта и подготовки нефти и газа на основе интеллектуальных регуляторов. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2015. – 110 с.
5. Сагдатуллин А.М. Автоматизация насосной станции системы транспорта и подготовки нефтепродуктов на базе интеллектуального логического регулятора // Тинчуринские чтения: материалы докл. IX Международ. молодеж. науч. конф. / под общ. ред. Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Изд-во: Казан. гос. энергет. ун-та, 2014. – Т. 2. – С. 166–167.
6. Леготкина Т.С., Данилова С.А. Моделирование систем управления: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 155 с.
7. Леготкина Т.С., Данилова С.А. Методы идентификации систем: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 123 с.
8. Хижняков Ю.Н. Нечеткое, нейронное и гибридное управление: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 303 с.
9. Хижняков Ю.Н. Алгоритмы нечеткого, нейронного и нейро-нечеткого управления в системах реального времени: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 156 с.
10. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление: пер. с англ. – 2-е изд. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
11. Хижняков Ю.Н. Современные проблемы теории управления: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 160 с.
12. Смирнов В.А., Хасанова А.А. Особенности реализации системы управления на нечеткой логике. – Челябинск: Изд-во Челябин. науч. центра, 2003. – Вып. 4(21). – С. 80–82.
13. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MatLab и FuzzyTech. – М., 2005. – 736 с.
14. Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю. Адаптивное управление в технических системах: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петербур. гос. ун-та, 2001. – 244 с.
15. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.

16. Гостев В.И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.

17. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: справочник. – Киев: Тэхника, 1990. – 280 с.

18. Тарасян В.С. Пакет Fuzzy Logic Toolbox for MatLab: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2013. – 112 с.

19. Лукас В.А. Теория управления техническими системами: учеб. пособие для вузов. – 4-е изд., испр. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005. – 677 с.

20. Круглов В.В., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Физматлит, 2001. – 224 с.

References

1. Baikov N.M., Pozdnyshv G.N., Mansurov R.I. Sbor i promyslovaia podgotovka nefi, gaza i vody [Gather and field treatment of oil, gas and water]. Moscow: Nedra, 1981, 261 p.

2. Lutoshkin G.S. Sbor i podgotovka nefi, gaza i vody [Gather and preparation of oil, gas and water]. Moscow: Nedra, 1977, 192 p.

3. Sagdatullin A.M. Analiz podkhodov k postroeniiu sistem neftegazodobyvaiushchego predpriiatiia [Analysis of approaches to the construction of systems for an oil and gas production enterprise]. *Polzunovskii vestnik*, 2013, no. 4-2, pp. 78-83.

4. Sagdatullin A.M. Povyshenie effektivnosti upravleniia sistemoi transporta i podgotovki nefi i gaza na osnove intellektual'nykh regulatorov [Improving the management efficiency of the oil and gas transportation and processing system based on intelligent regulators]. Kazan: Kazanskii universitet, 2015, 110 p.

5. Sagdatullin A.M. Avtomatizatsiia nasosnoi stantsii sistemy transporta i podgotovki nefteproduktov na baze intellektual'nogo logicheskogo regulatora [Automation of the pumping station of the system of transportation and preparation of petroleum products based on an intelligent logic controller]. *Tinchurinskie chteniia. Materialy dokladov IX Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchnoi konferentsii*. Ed. E.Iu. Abdullazianov. Kazan: Kazanskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2014, vol. 2, pp. 166-167.

6. Legotkina T.S., Danilova S.A. Modelirovanie sistem upravleniia [Modeling control systems]. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 155 p.

7. Legotkina T.S, Danilova S.A. Metody identifikatsii sistem [Systems identification methods]. Perm: Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008, 123 p.

8. Khizhniakov Iu.N. Nechetkoe, neuronnoe i gibridnoe upravlenie [Fuzzy, neural and hybrid control]. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, 303 p.

9. Khizhniakov Iu.N. Algoritmy nechetkogo, neuronnogo i neuro-nechetkogo upravleniia v sistemakh real'nogo vremeni [Algorithms of fuzzy, neural and neuro-fuzzy control in real time systems]. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013, 156 p.

10. Pegat A. Nechetkoe modelirovanie i upravlenie [Fuzzy modeling and control]. 2nd ed. Moscow: Binom. Laboratoriia znanii, 2013, 798 p.

11. Khizhniakov Iu.N. Sovremennye problemy teorii upravleniia [Modern problems of control theory]. Perm: Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2014, 160 p.

12. Smirnov V.A., Khasanova A.A. Osobennosti realizatsii sistema upravleniia na nechetkoi logike [Features of the implementation of the control system based on fuzzy logic]. Chelyabinsk: Cheliabinskii nauchnyi tsentr, 2003, iss. 4(21), pp. 80-82.

13. Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MatLab i FuzzyTech [Fuzzy modeling in MatLab and FuzzyTech]. Moscow, 2005, 736 p.

14. Antonov V.N., Terekhov V.A., Tiukin I.Iu. Adaptivnoe upravlenie v tekhnicheskikh sistemakh [Adaptive control in technical systems]. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi universitet, 2001, 244 p.

15. Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkikh sistem sredstvami MatLab [Designing fuzzy systems using MatLab]. Moscow: Горячая линия-Телеком, 2007, 288 p.

16. Gostev V.I. Proektirovanie nechetkikh regulatorov dlia sistem avtomaticheskogo upravleniia [Fuzzy controllers design for automatic control systems]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011, 416 p.

17. Gostev V.I. Sistemy upravleniia s tsifrovymi regulatorami: spravochnik [Control systems with digital regulators: a reference]. Kiev: Tekhnika, 1990, 280 p.

18. Tarasian V.S. Paket Fuzzy Logic Toolbox for MatLab [Fuzzy Logic Toolbox for MatLab]. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi universitet putei soobshcheniia, 2013, 112 p.

19. Lukas V.A. Teoriia upravleniia tekhnicheskimi sistemami [Technical systems control theory]. 4nd ed. Ekaterinburg: Ural'skii gosudarstvennyi gornyi universitet, 2005, 677 p.

20. Kruglov V.V., Golunov R.Iu. Nechetkaia logika i iskusstvennye neironnye seti [Fuzzy logic and artificial neural networks]. Moscow: Fizmatlit, 2001, 224 p.

Сведения об авторах

Хижняков Юрий Николаевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: H1941@yandex.ru).

Никулин Вячеслав Сергеевич (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kalif23@yandex.ru).

Сторожев Сергей Александрович (Пермь, Россия) – аспирант кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: cepra5@mail.ru).

About the authors

Khizhnyakov Yuri Nikolaevich (Perm, Russian Federation) is a Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: H1941@yandex.ru).

Nikulin Vyacheslav Sergeevich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kalif23@yandex.ru).

Storozhev Sergey Aleksandrovich (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student of the Department of Automation and Telemechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: cepra5@mail.ru).

Получено 17.08.2020