

УДК 004.896

DOI: 10.22213/2410-9304-2021-2-83-89

## Применение методов нечеткой логики и нейронных сетей для автоматизации технологических процессов в нефтегазовом машиностроении и повышения эффективности добычи нефти

А. М. Сагдатуллин, кандидат технических наук, Лениногорский филиал Казанского национального исследовательского технического университета им. А. Н. Туполева – КАИ, Лениногорск, Россия

В данной работе рассматривается вопрос повышения эффективности функционирования насосных систем, как наиболее энергоемкой части нефтегазового месторождения. Обоснована актуальность темы исследования для нефтегазового машиностроения, сформулирована основная цель исследования, заключающаяся в цифровизации рассматриваемых процессов и создании отечественных систем автоматического управления с применением алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей. Рассмотрены методы построения современных систем управления, проанализированы их достоинства и недостатки. Рассмотрены особенности различных подходов к построению систем автоматического управления технологическими объектами при добыче и транспортировке нефти. Наиболее распространенными являются метод прямого цифрового управления или метод с применением обратных связей. Представлено классическое описание объектов автоматизации и телемеханизации на основе параметров систем. Приведены основные характеристики рассматриваемых технологических процессов, таких как добыча, подготовка и транспортировка нефти, не позволяющие добиться максимальной эффективности в существующем подходе. Выявлены наиболее важные факторы для эффективности систем автоматического управления данными объектами. Полученные экспериментальные данные показали, что параметры технологического процесса варьируются в значительных пределах от номинальных значений, что приводит к невысокому качеству работы регуляторов. Точность моделей идентификации системы на основе линейных авторегрессионных методов составляет не более 30 %. Сделан вывод о необходимости применения для управления нелинейными объектами с присущими неопределенностями на основе нейронечетких и нечетких регуляторов с дискретными термами.

**Ключевые слова:** нечеткая логика, нейронные сети, нейронечеткий регулятор с дискретными термами.

### Введение

Угледородное сырье играет важную роль в развитии целых отраслей промышленности и секторов экономики и производства. Нефтегазовое машиностроение является одной из наиболее важных отраслей, так как данная отрасль определяет развитие техники и технологий не только для химической и нефтегазодобывающей промышленности, но и для взаимосвязанных секторов, таких как машиностроение, приборостроение и автоматизация. Насосные агрегаты составляют основное звено энергопотребителей в цепи добычи нефти, ее транспортировки и подготовки. Как правило, именно системы управления и автоматизации отвечают за повышение ресурса приводов и энергоэффективность, так как позволяют производить выбор заданного режима работы. Однако на практике предлагаемые системы управления не всегда позволяют оптимизировать заданные процессы, что влияет на рентабельность технологических звеньев. В связи с этим важной научно-технической проблемой, исследуемой в данной работе, является цифровизация заданных процессов и создание отече-

ственных систем автоматического управления с применением алгоритмов нечеткой логики и нейронных сетей [1].

### Системы управления и автоматизации технологических процессов на основе нечетких и нейронечетких регуляторов с дискретными термами

Существуют различные подходы к реализации систем автоматического управления технологическими объектами при добыче и транспортировке нефти. Наиболее распространенными являются метод прямого цифрового управления или метод с применением обратных связей (рис. 1).

На рис. 1 представлена схема прямого цифрового управления насосными станциями. Также данная схема применяется при управлении отдельными насосными агрегатами и скважинами с приводами станков-качалок. Описывается представленная система следующими векторами (входных  $\hat{x}$ , выходных  $\hat{y}$ , управляющих сигналов  $\hat{u}$ , функции управления  $u_i(t)$  и выходных значений  $y_i(t)$ ):

$$\hat{x} = \{x_1, x_2 \dots x_i\}; u_i(t) = F(x_i, y_i);$$

$$\hat{y} = \{y_1, y_2 \dots y_i\}; y_i(t) = f(x_i, z_i, u_i);$$

$$\hat{u} = \{u_1, u_2 \dots u_i\}.$$

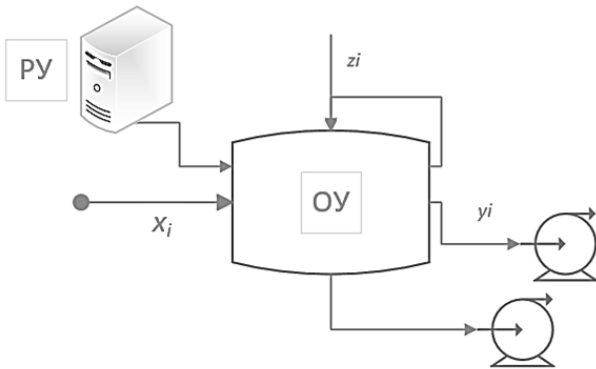


Рис. 1. Функциональная схема регулирования рассматриваемыми объектами: ПУ – регулирующее устройство (станция управления); ОУ – объект управления (резервуар);  $x_i$  – входные сигналы;  $y_i$  – выходные сигналы;  $x_i, u_i$  – управляющие воздействия;  $z_i$  – возмущающие воздействия

Данные системы могут иметь также обратные связи по параметрам технологического процесса, датчикам скорости, расхода или давления. Это вносит в объект управления дополнительные взаимосвязи. Классическая схема многомерной системы управления представлена на рис. 2.

Например, если в систему управления (рис. 2) будет установлен измерительный механизм:

$$\delta = \text{measure} - y_i,$$

$$y_i = \frac{w_{load}(p)}{1 + w(p)} w_i(t) + \frac{w(p)}{1 + w(p)} \text{measure},$$

где  $w_{load}(p)$  – передаточная функция объекта с учетом нагрузки,  $\delta$  – рассогласование системы управления.

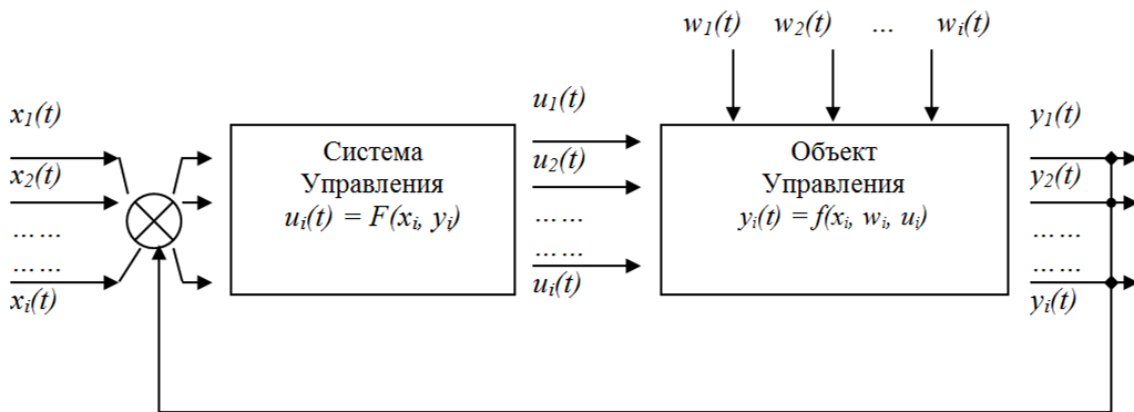


Рис. 2. Многомерная схема системы управления

Классическая схема предполагает управление объектом на базе линеаризованных уравнений. Уравнение системы в разомкнутом виде можно описать:

$$\frac{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}{(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) p^k} = \frac{x_i(p)}{y_i(p)} \Rightarrow,$$

$$y_i(p)(a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n) = x_i(p)(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) p^k.$$

В форме дифференциальных уравнений:

$$a_0 \frac{d^n}{dt^n} y_i(t) + a_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} y_i(t) + \dots + a_{n-1} \frac{d}{dt} y_i(t) + a_n y_i(t) =$$

$$\dots + a_{n-1} \frac{d}{dt} x_i(t) + a_n x_i(t) \Rightarrow,$$

$$b_0 \frac{d^n}{dt^n} x_i(t) + b_1 \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} x_i(t) + \dots + b_{k-1} \frac{d^{n+1}}{dt^{n+1}} x_i(t) + \dots + b_k \frac{d^n}{dt^n} x_i(t).$$

$$\begin{vmatrix} \dot{x} \\ y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} x \\ u \end{vmatrix}$$

где  $\frac{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}{(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) p^k} = w(p)$  – передаточная функция системы,  $p = d/dt$  – оператор дифференцирования,  $x_i(p), y_i(p)$  – входной и выходной параметры системы, числитель  $a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n$  и знаменатель  $(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_{m-1} p + b_m) p^k$  – поли-

номы системы, полученные в результате дифференцирования, имеющие астатизм степени  $k$ .

Анализ данных подходов к построению систем управления показал, что наиболее важными этапами служат: формулировка задачи управления и формализация объекта, исследование основных показателей качества работы регуляторов с учетом поставленных критериев. Однако технологические процессы добычи, подготовки и транспортировки нефти обладают рядом характеристик, не позволяющих добиться максимальной эффективности в существующем подходе. Это и динамика протекаю-

щих процессов, нестационарность и неопределенность параметров [2–5].

При идентификации (рис. 3) система рассматривается на определенном участке, имеющем, по большей части, линейную характеристику. На действующей установке возможно существенное отклонение протекающего процесса от номинальных значений, что приводит к невысокому качеству работы регуляторов. Так, точность моделей идентификации системы на основе линейных авторегрессионных методов составляет не более 30 %.

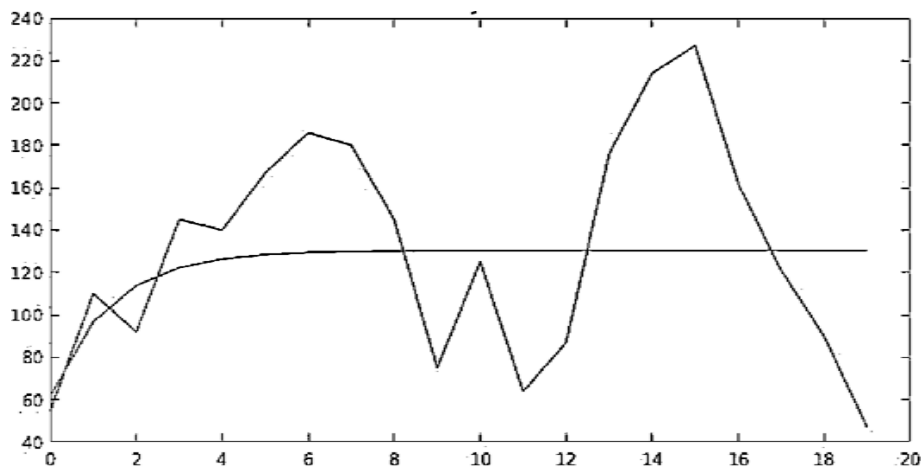


Рис. 3. График зависимости расхода от времени: 1 – характеристика действующего объекта; 2 – характеристика, полученная на основе модели идентификации системы

Изучению комплекса вопросов, связанных с управлением рассматриваемыми технологическими процессами, посвящено множество работ. Для повышения эффективности существующих систем возможно применение различных методов. Одним из данных методов является применение нечетких регуляторов, разработанных непосредственно для объекта управления.

Нечеткое регулирование позволяет рассматривать технологический процесс в виде вербального представления, описания правил его функционирования и работы подсистем. Значение параметра, поступающего в систему управления, проходит процесс фаззификации. Данный процесс направлен на получение «нечеткости» для представления в системе регулирования. Затем данное значение проходит подсистему правил, в которых определяется,

что необходимо предпринять для отработки поступившего значения (рис. 4) [6–8].

Классические нечеткие регуляторы обладают своими преимуществами и недостатками. К преимуществам можно отнести более гибкую постройку регулятора под процессы регулирования. К основным недостаткам можно отнести сложность настройки, разработки и управления в реальном масштабе времени при усложнении технологического процесса [9–11].

Повышение эффективности работы нечетких регуляторов достигается разработкой многомерного нечеткого регулятора или нейронечеткого регулятора с дискретными термами. Данные регуляторы отличаются спецификой построения и подходом к разработке. Также повышению эффективности способствует разработка специальная функция принадлежности для системы нечетких правил (рис. 5).

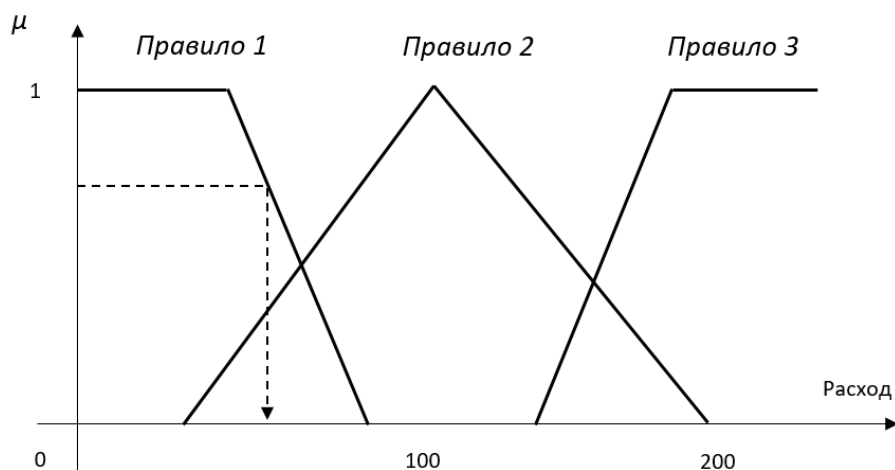


Рис. 4. График зависимости функции принадлежности нечеткого регулятора от параметра (расход, м<sup>3</sup>/ч)

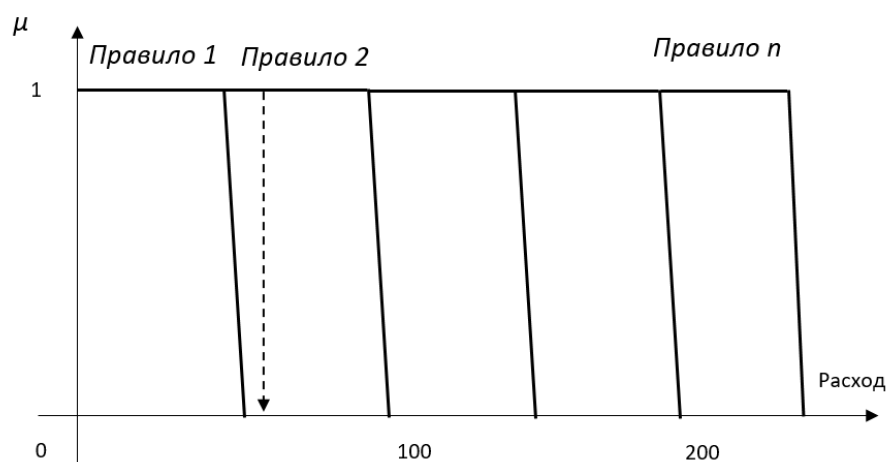


Рис. 5. График зависимости функции принадлежности нечеткого регулятора с дискретными термами от параметра (расход, м<sup>3</sup>/ч)

Значение параметра регулирования, например расхода  $Q$  жидкости из резервуара, интерпретируется множеством дискретных термов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_{n-1}, Q_n$  и выражается в виде совокупности:

$$T(Q) = \sum_{i=1}^n Q \cdot ((i-1) \cdot k \leq Q < i \cdot k),$$

где  $i$  – номер дискретного терма;  $k$  – коэффициент, отражающий разрешающую способность регулятора.

Нейронные сети применяются для улучшения работы регулятора за счет объединения возможностей обучения нейронных сетей на основе различных методов.

Гибкость таких систем достигается за счет особенностей их работы. В данном случае входные значения  $x_i$ , поступающие в систему регулирования, получают набор весовых коэффициентов  $w_i$ , затем получившиеся синаптические связи поступают на входы нечеткой системы с дискретными термами, результирующая сумма сигнала получает также смещение на величину  $w_0$ :

$$S_i = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0, \quad y = f(S_i),$$

где  $S_i$  – суммарный сигнал;  $w_0$  – воздействие порогового значения.

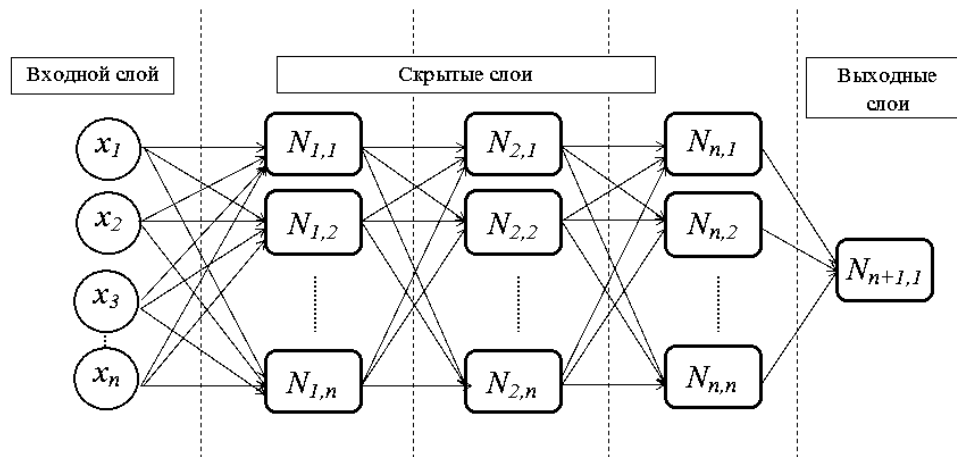


Рис. 6. Функциональная схема многослойной нейронной сети со скрытыми слоями и выходом на нечеткую подсистему

Данный подход позволяет получить достаточно высокое качество регулирования при небольшом количестве времени, затрачиваемого на обучение системы. На рис. 7 показана

модель прогнозирования расхода от времени при реализации нейронечеткой системы [11–15].

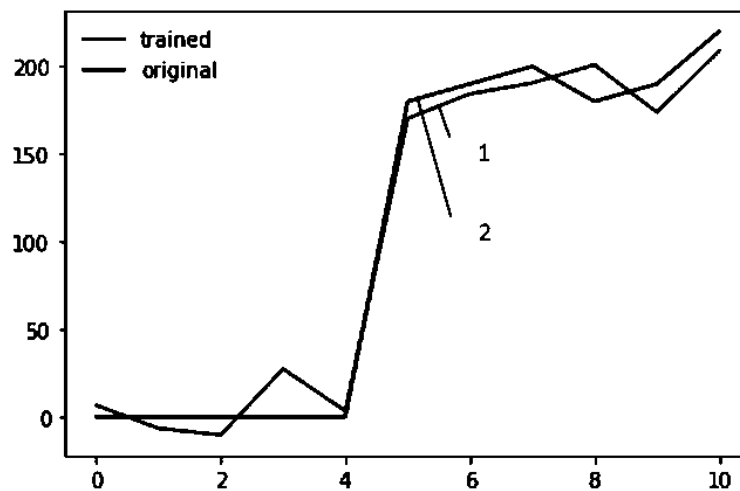


Рис. 7. График зависимости расхода от времени (с): 1 – моделируемая характеристика, 2 – реальная характеристика

В среднем, ошибка нейронечеткой системы не превышает 18 % даже в условиях неопределенности информации и параметров технологического процесса. На практике динамическое изменение свойств объектов управления и параметров оказывает существенное влияние на качество работы системы управления. Из приведенных выражений для линейных систем можно сделать вывод, что для управления таким классом объектов с присущими неопределенностями и нелинейной структурой наиболее эффективными методами являются системы с нечеткими регуляторами с дискретными термами и многомерные нейронечеткие регуляторы.

### Выводы

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Существующие технологические процессы и объекты управления нефтегазового машиностроения являются наиболее важными объектами автоматизации и управления, влияющими на энергетическую эффективность процесса и рентабельность производств. Математическое описание системы включает ряд параметров с нелинейной структурой. Неопределенность характеристик технологического процесса совместно с нелинейностью отдельных его звеньев не позволяет добиться высокого качества управления объектами на основе классических методов, включающих прямое цифровое регулирование, управление на основе

пропорциональных, дифференциальных или интегральных звеньев в цепи регуляторов. Для повышения эффективности таких систем является необходимым применение нечетких или нейронечетких регуляторов с дискретными термами и комбинированными схемами и алгоритмами автоматизированного управления.

### Библиографические ссылки

1. Дегтярев Г. Л., Сагдатуллин А. М. Модель интеллектуальной поддержки управления процессами добычи и транспорта нефти в условиях неопределенности // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2020. Т. 1. С. 11–17.

2. Тенев В. А., Шаталова О. М. Методы нечеткого логического вывода при построении экспертных систем прогнозирования инновационных процессов // Интеллектуальные системы в производстве. 2019. Т. 17. № 4. С. 129–136.

3. Vigya, Mahto, T. et al. Renewable generation based hybrid power system control using fractional order-fuzzy controller. *Energy Reports*. 2021. 7, pp. 641–653. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.022>.

4. Elsis, M., Bazmohammadi, N., Guerrero, J.M., Ebrahim, M.A. Energy management of controllable loads in multi-area power systems with wind power penetration based on new supervisor fuzzy nonlinear sliding mode control. *Energy*. 2021. 221, 119867. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119867.

5. Сагдатуллин А. М. Применение новой информационной модели при обучении моделированию производственных объектов машиностроения в условиях аддитивного производства // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2020. Т. 76. № 1. С. 94–98.

6. Оптимизация распределения функций принадлежности при синтезе нечеткого регулятора для систем управления тепловыми процессами / Е. П. Иванкова, В. Г. Косицын, В. А. Соловьев, С. П. Черный // Информатика и системы управления. 2003. № 1 (5). С. 73–82.

7. Демидова Г. Л., Кузина А. Ю., Лукичева Д. В. Особенности применения нечетких регуляторов на примере управления скоростью вращения электродвигателя постоянного тока // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16, № 5. С. 872–878.

8. Вильданов Р. Г., Панфилов В. В., Аслаев Р. Р. Исследование и реализация системы автоматического управления на основе нечеткой логики // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=19590> (дата обращения: 25.02.2021).

9. Солонников Ю. Я., Иванов В. Э. Реализация нечеткого регулятора для системы контроля уровня жидкости, используя программный комплекс labview // Ученые заметки ТОГУ : электронное научное издание. 2017. Т. 8, № 3. С. 119–125.

10. Сагдатуллин А. М. Разработка операторского интерфейса удаленного телеуправления для монитора реального времени заполнения смеси // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. 2020. Т. 76. № 1. С. 99–103.

11. Padhy S., Panda S. Application of a simplified Grey Wolf optimization technique for adaptive fuzzy PID controller design for frequency regulation of a distributed power generation system. 2021. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(1), 2. DOI: 10.1186/s41601-021-00180-4.

12. Taifour A. A., Ahmed H. A. Design of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Flow Systems. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2017, 4 (7): 532–540.

13. Rady Raz N. et al. Experiment-based affect heuristic using fuzzy rules and Taguchi statistical method for tuning complex systems. *Expert Systems with Applications*. Volume 172, 15 June 2021, 114638. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114638>.

14. Muhlasin et al. Optimization of Water Level Control Systems Using ANFIS and Fuzzy-PID Model. 2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE). DOI: 10.1109/ICVEE50212.2020.9243229.

15. Chabni F. et al. The Application of Fuzzy Control in Water Tank Level Using Arduino. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 7, no. 4, 2016. Pp. 261–265.

### References

1. Degtjarev G.L., Sagdatullin A.M. [A model of intellectual support for the management of oil production and transportation processes in conditions of uncertainty]. *Matematicheskie metody v tehnike i tehnologijah - MMTT*. 2020. Vol. 1. Pp. 11–17 (in Russ.).

2. Tenenev V.A., Shatalova O.M. [Methods of fuzzy inference in the construction of expert systems for forecasting innovative processes]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve*. 2019. Vol. 17, no. 4. Pp. 129–136 (in Russ.).

3. Vigya, Mahto, T. et al. Renewable generation based hybrid power system control using fractional order-fuzzy controller. *Energy Reports*. 2021. 7, pp. 641–653. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.01.022>.

4. Elsis, M., Bazmohammadi, N., Guerrero, J.M., Ebrahim, M.A. Energy management of controllable loads in multi-area power systems with wind power penetration based on new supervisor fuzzy nonlinear sliding mode control. *Energy*. 2021. 221, 119867. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119867.

5. Sagdatullin A.M. [Application of a new information model in teaching the modeling of industrial facilities in mechanical engineering in the conditions of additive manufacturing]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2020. Vol. 76, no. 1. Pp. 94–98 (in Russ.).

6. Ivankova E.P., Kosicyn V.G., Solov'ev V.A., Chernyj S.P. [Optimization of the distribution of mem-

bership functions in the synthesis of a fuzzy controller for control systems of thermal processes]. *Informatika i sistemy upravlenija*. 2003. No. 1. Pp. 73-82. (in Russ.).

7. Demidova G.L., Kuzina A.Ju., Lukicheva D.V. [Features of the use of fuzzy controllers on the example of controlling the rotation speed of a DC motor]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tehnologij, mehaniki i optiki*. 2016. Vol. 16, no. 5. Pp. 872-878 (in Russ.).

8. Vil'danov R.G., Panfilov V.V., Aslaev R.R. [Research and implementation of an automatic control system based on fuzzy logic]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya*. 2015. № 1-1 (in Russ.).

9. Solonnikov Ju. Ja., Ivanov V. Je. Realizacija nechetkogo reguljatora dlja sistemy kontrolja urovnja zhidkosti, ispol'zuja programmnyj kompleks labview [Implementation of a fuzzy regulator for a liquid level control system using the labview software complex]. *Jelektronnoe nauchnoe izdanie «Uchenye zametki TOGU»*. 2017, vol. 8, no. 3, pp. 119-125 (in Russ.).

10. Sagdatullin A.M. [Development of an operator interface for remote telecontrol for a real-time monitor of filling the mixture]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*. 2020. Vol. 76, no. 1. Pp. 99-103 (in Russ.).

11. Padhy S., Panda S. Application of a simplified Grey Wolf optimization technique for adaptive fuzzy PID controller design for frequency regulation of a distributed power generation system. 2021. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 6(1), 2. DOI: 10.1186/s41601-021-00180-4.

12. Taifour A. A., Ahmed H. A. Design of Adaptive Neuro-Fuzzy Controller for Flow Systems. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*, 2017, 4 (7): 532-540.

13. Rady Raz N. et al. Experiment-based affect heuristic using fuzzy rules and Taguchi statistical method for tuning complex systems. *Expert Systems with Applications*. Volume 172, 15 June 2021, 114638. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114638>.

14. Muhlasin et al. Optimization of Water Level Control Systems Using ANFIS and Fuzzy-PID Model. 2020 Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE). DOI: 10.1109/ICVEE50212.2020.9243229.

15. Chabni F. et al. The Application of Fuzzy Control in Water Tank Level Using Arduino. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 7, no. 4, 2016. Pp. 261-265.

\*\*\*

### **Application of Methods of Fuzzy Logic and Neural Networks for Automation of Technological Processes in Oil and Gas Engineering and Increasing the Efficiency of Oil Production**

A. M. Sagdatullin, PhD in Engineering, Leninogorsk branch of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Leninogorsk, Russia

*This paper discusses the issue of improving the efficiency of pumping systems, as the most energy-intensive part of an oil and gas field. The relevance of the research topic for the oil and gas engineering industry is considered, the main goal of the research is formulated, which is to digitalize the processes under consideration and create domestic automatic control systems using fuzzy logic algorithms and neural networks. Methods of constructing modern control systems are considered, their advantages and disadvantages are analyzed. The features of various approaches to the construction of automatic control systems for technological objects during oil production and transportation are considered. The most common are direct digital control or feedback. A classic description of automation and telemechanization objects based on system parameters is presented. The main characteristics of the considered technological processes, such as oil production, preparation and transportation, which do not allow for achieving maximum efficiency in the existing approach are given. The most important factors for efficient systems of automatic data objects are identified. The experimental data obtained have shown that the parameters of the technological process vary within significant limits from the nominal values, which leads to a low quality of operation of the regulators. The accuracy of the system identification models based on linear autoregressive methods is no more than 30%. It is concluded that it is necessary to use for control of nonlinear objects with inherent uncertainties based on neuro-fuzzy and fuzzy controllers with discrete terms.*

**Keywords:** fuzzy logic, neural networks, neuro-fuzzy controller with discrete terms

Получено: 02.03.2021