

# Программная модель интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья

*М.И. Дли<sup>1,2</sup>, А.Ю. Пучков<sup>1\*</sup>, М.В. Максимкин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия,

<sup>2</sup>Университет «Синергия», Москва, Россия

\*putchkov63@mail.ru

**Аннотация.** Интеллектуальные системы управления технологическими процессами позволяют на качественно новом уровне анализировать поступающую информацию об объекте управления и внешней среде и на этой основе повышать эффективность всего производства. В статье представлены результаты исследования, целью которого была разработка программной модели интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья. Сложность процессов заключается во взаимосвязи многих переменных, характеризующих технологические агрегаты, участвующие в переработке. Математические модели таких взаимосвязей позволяют с высокой точностью описывать процессы, но приводят к сложным выкладкам, которые затруднительно применять в реальных условиях. Использование новых вычислительных алгоритмов из группы интеллектуальных методов позволило преодолеть это затруднение, обеспечив, с одной стороны, хорошую точность решений, а с другой – сделав возможным автоматизацию настройки системы управления на изменяющиеся входные воздействия и внешние условия. Основу предложенной программной модели составляет глубокая нейронная сеть долгой краткосрочной памяти, решающая задачу регрессии при анализе входных данных и расчете управляющих воздействий. Новизну результатов исследования составляет структура программной модели интеллектуальной системы управления, включающая нейронную сеть как регулятор и иерархическую систему нечеткого вывода для обобщенной оценки качества управления. Оригинальной особенностью программной структуры является применение вычислителя производных разных порядков для подачи их на вход нейронной сети, что способствует расширению ее рецептивного поля и повышает точность ее результатов. Апробирование предложенной структуры программной модели проводилось в среде MatLab-Simulink. Результаты имитационного эксперимента показали, что, в отличие от ПИД-регулятора, применение глубокой нейронной сети как регулятора позволяет успешно компенсировать влияние внешних факторов на качество управления.

**Ключевые слова:** интеллектуальные системы управления, глубокие нейронные сети, иерархические нечеткие системы, переработка мелкодисперсного рудного сырья

**Для цитирования:** Дли М.И., Пучков А.Ю., Максимкин М.В. Программная модель интеллектуальной системы управления сложными процессами переработки мелкорудного сырья // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 6. С. 96–112. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112

# Software model of an intelligent control system for complex processes of small-scale ore processing

M. Dli<sup>1,2</sup>, A. Puchkov<sup>1\*</sup>, M. Maksimkin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

<sup>2</sup>Synergy University, Moscow, Russia

putchkov63@mail.ru

**Abstract.** Intelligent process control systems allow analyzing incoming information about the control object and the external environment at a qualitatively new level and, on this basis, increasing the efficiency of the entire production. The article presents the results of a study aimed at developing a software model of an intelligent control system for complex processes of small-scale ore processing. The complexity of the processes lies in the interrelationship of many variables describing the technological units involved in processing. An analytical description of such interrelations allows describing processes with high accuracy, but leads to complex calculations that are difficult to apply in real conditions. The use of new computational algorithms from the group of intelligent methods made it possible to overcome this contradiction, ensuring, on the one hand, good accuracy of solutions, and on the other hand, making it possible to automate the adjustment of the control system to changing input effects and external conditions. The basis of the proposed software model is a deep neural network of long short-term memory, solving the regression problem when analyzing input data and calculating control effects. The novelty of the research results is the structure of the software model of the intelligent control system, including a neural network as a regulator and a hierarchical system of fuzzy inference for a generalized assessment of the control qualities. An original feature of the software structure is the use of a calculator of derivatives of different orders to feed them to the input of the neural network, which helps to expand its receptive field and increases the accuracy of its results. Testing of the proposed structure of the software model was carried out in the MatLab-Simulink environment. The results of the simulation experiment showed that, unlike the PID controller, the use of a deep neural network as a regulator allows for successful compensation of the influence of external factors on the quality of control.

**Keywords:** intelligent control systems, deep neural networks, hierarchical fuzzy systems, processing of finely dispersed ore raw materials

**For citation:** Dli M., Puchkov A., Maksimkin M. Software model of an intelligent control system for complex processes of small-scale ore processing. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2024, vol.19, no.6, pp.96-112 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-6-96-112

## Введение

Технологические процессы переработки мелкорудного (мелкодисперсного) сырья характеризуются как большим расходом непосредственно самих рудных ресурсов, так и значительными затратами тепловой и электриче-

ской энергии [1, 2]. Это обстоятельство приводит к необходимости обеспечивать высокое качество управления технологическими агрегатами и процессами, так как даже незначительные относительные отклонения от оптимальных режимов их работы способны привести к существен-