

DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-4-107-125

Гибридная цифровая модель на основе Neural ODE в задаче повышения экономической эффективности переработки мелкорудного сырья

А.Ю. Пучков^{1*}, Я.А. Федулов¹, В.С. Минин², А.С. Федулов¹

¹Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия

²ООО «ВИСОМ», Смоленск, Россия

*putchkov63@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты исследования, целью которого являлась разработка структуры гибридной цифровой модели управления процессами переработки мелкорудного сырья, а также алгоритма преобразования технологических данных в соответствии с этой структурой, обеспечивающего повышение качества управления и, как следствие, экономическую эффективность переработки. Оригинальной идеей, положенной в основу гибридной цифровой модели, является применение нейронных обыкновенных дифференциальных уравнений (Neural ODE) для расчета динамики технологических объектов и реализуемых в них процессов. Neural ODE являются разновидностью физически-мотивированных нейронных сетей, использующих физические законы в процессе своего обучения. Получаемая в результате цифровая интеллектуальная система машинного обучения способна с высокой точностью восстанавливать функцию динамики, используя данные наблюдений за технологическим объектом или процессом. Предложенная гибридная модель предусматривает совместное применение Neural ODE и имитационных Simulink-моделей технологических процессов переработки мелкорудного сырья при расчете управляющих воздействий. Это позволяет быстро моделировать и анализировать реакцию динамических объектов на управляющие воздействия и оперативно вносить необходимые изменения, не дожидаясь реакции физического оригинала. Проведенные численные эксперименты показали, что применение Neural ODE в составе гибридной цифровой модели с высокой точностью воспроизводит динамику технологических объектов при различных начальных условиях. Для сравнения были проведены эксперименты с моделью, в которой вместо Neural ODE была использована рекуррентная нейронная сеть LSTM. Эксперименты продемонстрировали, что в последнем случае динамика моделировалась с высокой точностью только при исходных начальных условиях, а при их изменении происходила ее сильная деградация. В то же время применение Neural ODE вместо LSTM показало устойчиво высокую точность отображения динамики при указанных изменениях, что будет способствовать улучшению качества управления технологическими процессами переработки мелкорудного сырья и их экономической эффективности.

Ключевые слова: нейронные дифференциальные уравнения, интеллектуальные системы машинного обучения, моделирование динамических объектов, экономическая эффективность технологических систем

Для цитирования: Пучков А.Ю., Федулов Я.А., Минин В.С., Федулов А.С. Гибридная цифровая модель на основе Neural ODE в задаче повышения экономической эффективности переработки мелкорудного сырья // Прикладная информатика. 2024. Т. 19. № 4. С. 107–125. DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-4-107-125

Hybrid digital model based on Neural ODE in the task of increasing the economic efficiency of processing small-ore raw materials

A. Puchkov^{1*}, Ya. Fedulov¹, V. Minin², A. Fedulov¹

¹Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

²VISOM LLC, Smolensk, Russia

*putchkov63@mail.ru

Abstract. The results of a study are presented, the purpose of which was to develop the structure of a hybrid digital model for managing the processes of processing small-ore raw materials, as well as an algorithm for converting technological data in accordance with this structure, ensuring improved management quality and, as a consequence, the economic efficiency of processing. The original idea underlying the hybrid digital model is the use of neural ordinary differential equations (Neural ODE) to calculate the dynamics of technological objects and the processes implemented in them. Neural ODEs are a type of physics-motivated neural networks that use physical laws during their learning process. The resulting digital intelligent machine learning system is capable of highly accurate reconstruction of the dynamics function using observational data of a technological object or process. The proposed hybrid model provides for the joint use of Neural ODE and Simulink simulation models of technological processes for processing fine ore raw materials when calculating control actions. This allows you to quickly model and analyze the reaction of dynamic objects to control inputs and quickly make the necessary changes without waiting for the reaction of the physical original. Numerical experiments have shown that the use of Neural ODE as part of a hybrid digital model accurately reproduces the dynamics of technological objects under various initial conditions. For comparison, experiments were carried out with a model in which an LSTM recurrent neural network was used instead of Neural ODE. Experiments demonstrated that in the latter case, the dynamics were simulated with high accuracy only under the original initial conditions, and when they changed, it was severely degraded. At the same time, the use of Neural ODE instead of LSTM has shown consistently high accuracy in displaying dynamics under these changes, which will help improve the quality of control of technological processes for processing fine ore raw materials and their economic efficiency.

Keywords: neural differential equations, intelligent machine learning systems, modeling of dynamic objects, economic efficiency of technological systems

For citation: Puchkov A., Fedulov Ya., Minin V., Fedulov A. Hybrid digital model based on Neural ODE in the task of increasing the economic efficiency of processing small-ore raw materials. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2024, vol.19, no.4, pp.107-125 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2024-19-4-107-125

Введение

Обеспечение экономической эффективности производства становится одной из главных проектных задач, когда дело доходит до внедрения результатов научных изысканий в практическую

деятельность. Однако для сложных технологических систем эффективность не сводится только к экономической, выражаемой увеличением прибыли или уменьшением издержек, но и ростом экологической безопасности производства,