

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МИКРОФЛЮИДНЫМ ХИМИЧЕСКИМ СИНТЕЗОМ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА И ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Ржевский С.С.¹, Бурдин Е.А.², Федоров А.С.³, Чеченин Д.С.⁴

Научные консультанты – кандидат физ.-мат. наук, Тальянов П.М.², Некрасов Е.А.²

¹Общество с ограниченной ответственностью «РР Роботикс»,

²Университет ИТМО,

³Общество с ограниченной ответственностью «Сигма Роботех»,

⁴Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

serg.rzhevskii@gmail.com

Введение.

В условиях развития малотоннажной химии и перехода к технологическому суверенитету особую актуальность приобретает создание компактных, безопасных и автоматизированных установок химического синтеза. Микрофлюидные системы обеспечивают эффективный тепло- и массообмен, высокий уровень контроля параметров процесса и возможность масштабирования производства [1]. Одновременно с этим активно развивается концепция цифровых двойников — виртуальных моделей физических объектов, динамически связанных с реальными установками [2]. Интеграция цифровых двойников с интеллектуальными методами управления открывает возможности для создания «самоадаптивных» химических установок. В частности, методы обучения с подкреплением (т.н. reinforcement learning, RL) показали эффективность при управлении нелинейными динамическими системами [3].

Целью настоящей работы является разработка прототипа микрофлюидной установки химического синтеза, оснащённой цифровым двойником и интеллектуальной системой управления на основе обучения с подкреплением.

Основная часть.

В работе реализован лабораторный прототип микрофлюидной установки проточного химического синтеза с производительностью до 50 мл/мин. Аппаратная часть включает шприцевые дозаторы, реакционные модули трубчатого и чипового типов, систему термостатирования, датчики температуры и давления, а также исполнительные модули на базе микроконтроллеров STM32 и встраиваемого компьютера Orange Pi. Разработан цифровой двойник установки, включающий математическую модель тепломассообмена и кинетики реакции, реализованную в виде программного модуля. Цифровой двойник используется как среда обучения интеллектуального управляющего агента. Для реализации адаптивного управления применены алгоритмы обучения с подкреплением DQN, PPO и DDPG. Среда обучения формализована в терминах состояний (температура, расход, давление), действий (изменение управляющих параметров) и функции награды, отражающей выход целевого продукта и устойчивость процесса. Обучение агента выполнялось в виртуальной среде цифрового двойника, после чего стратегия управления интегрировалась в реальный прототип через интерфейсы MQTT, RS-485 и Ethernet. Экспериментальное тестирование проводилось на примере реакции синтеза перекиси метилэтилкетона. Показано, что интеллектуальное управление обеспечивает более точное удержание температуры в рабочем диапазоне (около 5 °С), снижение перерегулирования по сравнению с ПИД-регулятором и повышение воспроизводимости выхода продукта.

Выводы.

Создан и протестирован прототип микрофлюидной установки с цифровым двойником и интеллектуальной системой управления. Продемонстрирована возможность интеграции методов обучения с подкреплением в контур управления химическим процессом. Полученные результаты подтверждают перспективность использования цифровых двойников и RL-подходов для повышения устойчивости и эффективности микрофлюидного синтеза. Разработанная система может рассматриваться как основа для создания автономных лабораторных и малотоннажных производственных установок химического синтеза.

Собрана и протестирована рабочая установка умного микрофлюидного синтеза, которая проходит испытания в ряде исследовательских и промышленных лабораторий Санкт-Петербурга и Москвы: Университет ИТМО, ООО «Микрофлюидика», ООО «Флюитек» и др.

Литература:

1. Plutschack M. B. et al. The hitchhiker's guide to flow chemistry // *Chemical reviews*. – 2017. – Т. 117. – №. 18. – С. 11796-11893
2. Peterson L. et al. Digital twins in process engineering: An overview on computational and numerical methods // *Computers & Chemical Engineering*. – 2025. – Т. 193. – С. 108917.
3. Sutton R. S., Barto A. G. Temporal-difference learning // *Reinforcement learning: an introduction*. – 2018. – С. 131-132.

Ржевский С.С. _____

Бурдин Е.А. _____

Федоров А.С. _____

Чеченин Д.С. _____

Тальянов П.М _____

Некрасов Е.А _____