

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННЫМ БЛОКОМ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА

Козлова Ю.М.¹, Емельянов А.М.², Надеждин И.С.³

¹ ТПУ, группа 0702, e-mail: ymk5@tpu.ru

² ТПУ, ассистент ОЯТЦ ИЯТШ, e-mail: ame8@tpu.ru

³ ТПУ, доцент ОЯТЦ ИЯТШ, e-mail: kun9@tpu.ru

Введение

Автоматизированные системы управления (САУ) стали неотъемлемой частью современных технологических процессов, поскольку их разработка и внедрение направлены на повышение эффективности, безопасности и надежности. Это особенно важно в таких отраслях, как химическая, атомная, нефтегазовая промышленность, где критичное значение имеет безопасность из-за высоких рисков взрывов, пожаров и негативного воздействия на здоровье человека. Одним из ключевых направлений в оптимизации и управлении технологическими процессами является применение методов искусственного интеллекта. С развитием микрокомпьютерных технологий все большую популярность приобретают алгоритмы управления на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), которые позволяют значительно улучшить работу САУ и адаптироваться к изменяющимся условиям и возмущениям.

Целью данной работы является разработка автоматизированной системы управления экстракционным блоком на базе нейросетевого регулятора для повышения качества стабилизации концентрации урана в экстракте.

Для упрощения интеграции разработанного нейрорегулятора в САУ действующего радиохимического производства в данной работе предлагается метод дублирующей работы регуляторов.

Синтез нейросетевого регулятора

Жидкостная экстракция представляет собой значимый технологический процесс (ТП) при переработке отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Данный процесс обеспечивает извлечение ценных компонентов топлива, таких как уран и плутоний, а также их эффективную очистку от примесей. Эффективность экстракции определяется составом ОЯТ, степенью его выгорания, параметрами экстракционной системы и качеством управления технологическим процессом с использованием АСУ.

В работе [1] была предложена комбинированная модель процесса экстракции целевых компонентов с применением нейросетевых технологий. Математическая модель, представленная в работе [2], была проверена на адекватность с использованием экспериментальных данных.

Для синтеза автоматизированной системы управления была проведена идентификация объекта управления. Для этого на ранее разработанной и верифицированной комбинированной математической модели процесса экстракции [1, 2] был проведен вычислительный эксперимент, заключающийся в ступенчатом изменении управляющего воздействия (расход водной фазы). В результате вычислительного эксперимента была получена кривая разгона, по которой была определена передаточная функция объекта управления:

$$W_{ог}(s) = \frac{0,2958}{1077,0968s + 1}.$$

Приведенное среднеквадратическое отклонение идентификации составляет 1,63 %.

В данной работе был разработан нейросетевой регулятор по методу обратного распространения ошибки через прямой нейроэмулятор с эталонной моделью [3, 4]. Нейроэмулятором является нейросеть, полностью повторяющая поведение обобщенного объекта управления. Структура разработанного нейрорегулятора представляет собой ИНС, состоящую из двух слоев с 60 и 40 нейронами, соответственно, она представлена на рис. 1.

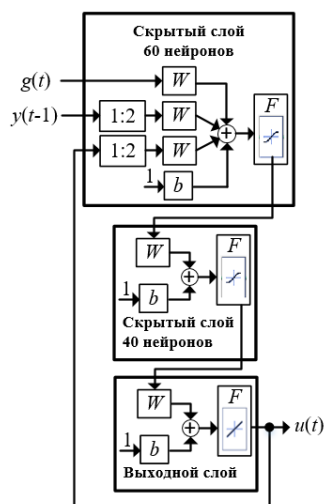


Рис. 1. Структурная схема нейрорегулятора

В рамках исследования разработанной САУ с помощью компьютерного моделирования был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого задающее устройство вырабатывало единичный ступенчатый сигнал уставки. Вычислительный эксперимент проводился для конфигурации САУ с нейрорегулятором и с ПИД-регулятором, параметры которого рассчитаны с помощью метода оптимального модуля (МОМ).

Изменение концентрации урана в экстракте при единичном ступенчатом управляющем сигнале для САУ со всеми разработанными регуляторами представлены в относительных единицах на рис. 2.

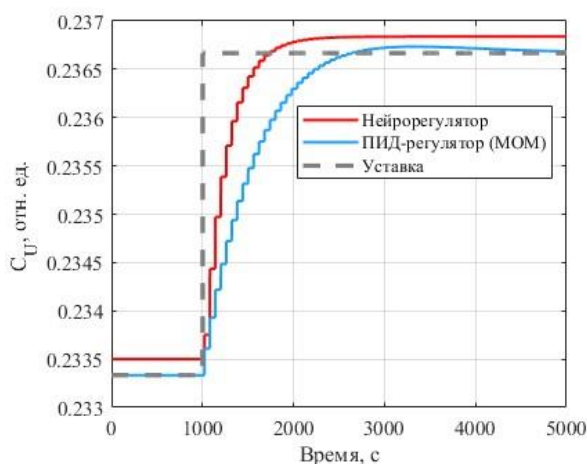


Рис. 2. Реакция САУ с разными регуляторами на ступенчатое управляющее воздействие

Для переходных процессов, представленных на рис. 1, были рассчитаны показатели качества, а именно время регулирования, перерегулирование и интегральный квадратичный критерий, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Показатели качества рассмотренных САУ по управляющему воздействию

Регулятор	QIC	$t_{\text{рег. упр.}}, \text{с}$	$\sigma, \%$
Нейрорегулятор	0,2092	740	0
ПИД-регулятор (МОМ)	0,2944	1220	0,52

Далее был проведен вычислительный эксперимент, в рамках которого на объект управления подавалось единичное ступенчатое возмущающее воздействие. Изменение концентрации урана в

экстракте при единичном ступенчатом возмущающим воздействием для САУ со всеми разработанными регуляторами представлены в относительных единицах на рис. 3.

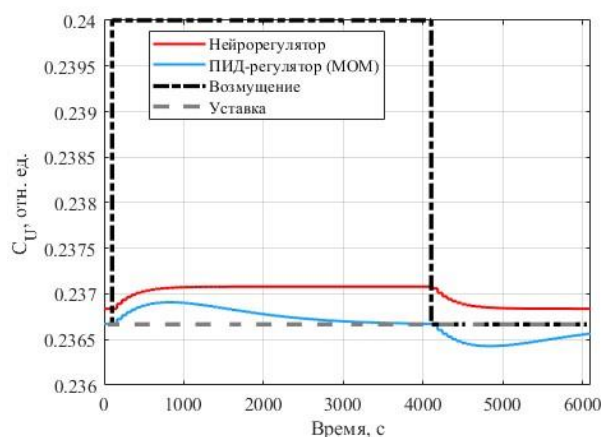


Рис. 3. Реакция САУ с разными регуляторами на ступенчатое возмущающее воздействие

Для переходных процессов, представленных на рис. 3, были рассчитаны показатели качества, а именно время регулирования, динамический коэффициент регулирования (R_d) и интегральный квадратичный критерий, которые представлены в таблица 2.

Таблица 2

Показатели качества рассмотренных САУ по возмущающему воздействию

Регулятор	QIC	$t_{\text{рег. возм.}}, \text{с}$	R_d
Нейрорегулятор	0,1185	420	0,3455
ПИД-регулятор (МОМ)	0,0465	2520	0,3456

Как видно из графиков переходных процессов (рис. 2) и рассчитанных показателей качества (таблица 1), разработанный нейрорегулятор имеет лучшие показатели качества по управляющему воздействию, чем ПИД-регулятор (МОМ). Важным недостатком нейрорегулятора является наличие статической ошибки. Относительная статическая ошибка не превышает 5 %.

Как видно из графиков переходных процессов (рис. 8) и рассчитанных показателей качества (таблица 2), разработанный нейрорегулятор имеет лучшее время регулирования, чем ПИД-регулятор (МОМ).

Реализация нейросетевого регулятора

Для аппаратной реализации разработанного нейрорегулятора был выбран отечественный микрокомпьютер MB77.07, произведённый АО НТЦ «Модуль». Одним из ключевых преимуществ данного устройства является наличие двух вычислительных ядер: одно основано на архитектуре ARM, а второе – на архитектуре NMC 3. Специализированное ядро NMC 3, оптимизированное для нейровычислений, позволяет значительно повысить быстродействие разработанного нейрорегулятора.

Главным недостатком MB77.07 является отсутствие поддержки вычислений чисел с плавающей точкой на ядре NMC. Для выполнения вычислений на этом ядре был разработан алгоритм квантизации и деквантизации данных до 16-битного формата, который выполняется на ядре ARM. Максимальная относительная ошибка, вызванная квантизацией при реализации ИНС, не превышает 0,5 %.

Для упрощения интеграции разработанного нейрорегулятора в САУ действующего радиохимического производства в данной работе предлагается метод дублирующей работы регуляторов. Данный метод позволит обеспечить работу нейрорегулятора без необходимости долгой остановки производства и демонтажа существующей САУ. Также это упростит настройку и корректировку параметров САУ под нейрорегулятор.

Суть метода заключается в том, что с классического ПИД-регулятора, реализованного, например, на ПЛК «Овен», на нейрорегулятор поступают значения уставки и измеренной величины. Нейрорегулятор определяет необходимое управляющее воздействие, которое поступает на ПЛК и далее, без

изменений, на перистальтический насос. Структура разработанного программного обеспечения нейросетевого регулятора на модуле MB 77.07 представлена на рис. 4.

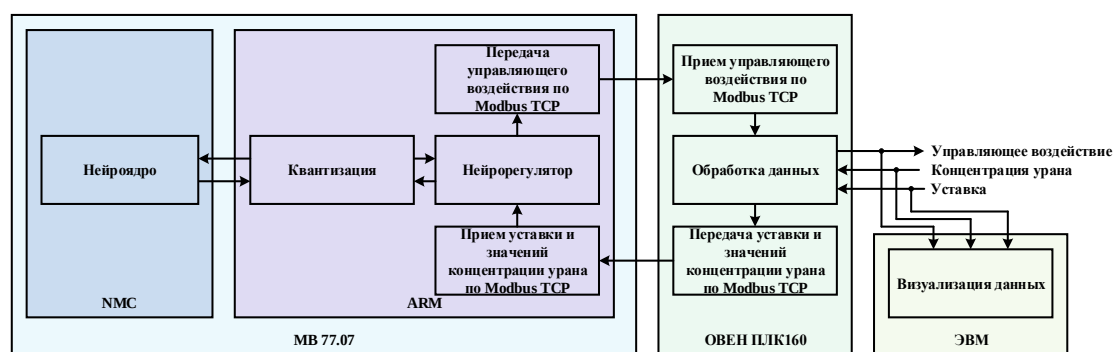


Рис. 4. Структура разработанного программного обеспечения нейросетевого регулятора на модуле MB 77.07

Заключение

В данной работе была разработана автоматизированная система управления экстракционным блоком с использованием нейросетевого регулятора, основанного на методе обратного распространения ошибки через прямой нейроэмулятор с эталонной моделью. Проведённое исследование продемонстрировало возможность применения искусственных нейронных сетей для автоматизации технологических процессов ядерно-топливного цикла. Система управления экстракционным блоком, состоящим из центробежных экстракторов, и оснащённая нейрорегулятором, была сравнена с системой, основанной на ПИД-регуляторе, обученном по методу оптимального модуля. Разработанный нейрорегулятор продемонстрировал лучшие результаты по управляющему воздействию по всем показателям качества (таблица 1), а также по времени регулирования в ответ на возмущающее воздействие (таблица 2).

Нейрорегулятор был реализован на отечественном микрокомпьютере MB 77.07, особенностью которого является наличие специализированного ядра для нейровычислений. Время, требуемое для формирования управляющего воздействия, составляет 100 мс, что значительно меньше времени дискретизации автоматизированной системы управления. В будущем планируется реализация разработанной системы управления на лабораторном стенде, имитирующем экстракционный блок.

Список использованных источников

1. Емельянов А.М., Надеждин И.С., Ливенцов С.Н. Разработка искусственной нейронной сети для комбинированной модели процесса экстракции урана // Атомная энергия. – 2023. – Т. 135. – № 1. – С. 183–187.
2. Козлова Ю.М., Емельянов А.М., Надеждин И.С. Комбинированная модель процесса экстракционного аффинажа с применением нейросетевых технологий // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР. – 2024. – Ч. 2 – С. 119–122.
3. Савицкий А.В., Павловский В.Е. Модель квадрокоптера и нейросетевой алгоритм управления // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2017. – № 77. – 20 с.
4. Long H.D., Dudarenko N. Synchronization of two-rotor vibration units using neural network-based PID controller // Cybernetics and Physics. – 2022. – Vol. 11. – No. 3. – P. 136–144.