

characteristics and peripheral capabilities of microcontrollers manufactured in Russia and friendly countries are considered. Special attention is paid to issues of compatibility, development ecosystem, availability of documentation and readiness for serial application in various industries – from process automation to energy and transport systems. A conclusion is drawn about the current state of the market, key players and promising directions for the development of the domestic component base in the industrial microcontroller segment.

Keywords: *microcontroller, industrial automation, import substitution, domestic electronic component base, ARM Cortex, RISC-V, peripheral interfaces, real-time, fault tolerance, development ecosystem.*

Об авторе:

МИНБАЕВ Айдар Марселевич – студент бакалавриата, КНИТУ-КАИ «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева», Казань. E-mail: ajdarminbaev2@gmail.ru

About the author:

MINBAEV Aidar Marselevich – Undergraduate Student, KNRTU-KAI "Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev", Kazan. E-mail: ajdarminbaev2@gmail.ru

УДК 628.35:62-5

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ НИТРИ-ДЕНИТРИФИКАЦИИ НА ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИЯХ

А.Ю. Эйтерник, Н.А. Малев

© Эйтерник А.Ю., Малев Н.А., 2026

Аннотация. *В статье представлен аналитический обзор современных подходов к управлению процессом биологического удаления азота на очистных сооружениях. Особое внимание уделено адаптивным системам управления, позволяющим эффективно компенсировать нестационарность и нелинейность процесса нитри-денитрификации. Проанализированы различные архитектуры систем управления: от классических ПИД-регуляторов до систем с нейросетевой идентификацией и предиктивным управлением. Рассмотрены принципы косвенной адаптации, основанные на онлайн-идентификации параметров объекта. Показано, что комбинированные системы, сочетающие адаптивные алгоритмы с методами искусственного интеллекта, демон-*

стрируют наибольшую эффективность в условиях изменяющихся нагрузок и температурных режимов.

Ключевые слова: *биологическая очистка сточных вод, удаление азота, нитри-денитрификация, адаптивное управление, ПИД-регулятор, искусственные нейронные сети, предиктивное управление, система управления.*

Концепция более рационального использования воды подразумевает повторное применение сточных вод в технологических процессах. Однако для достижения требуемого уровня очистки могут потребоваться дополнительные усилия и инвестиции.

Максимально допустимая концентрация может быть достигнута путем объединения нескольких методов очистки сточных вод (механических, физических, химических, физико-химических, биологических и т.д.) в один комплекс. Несомненно, для реализации каждого процесса необходима система автоматического управления (САУ).

Адаптивную САУ можно считать одной из ключевых технологий в области промышленной автоматизации. Она позволяет создавать устройства и комплексы, способные самостоятельно адаптироваться и менять свое поведение в зависимости от внешних условий и требований. Сам термин «адаптивность» подразумевает способность системы быстро реагировать на трансформации во внешней среде, а также во внутренних условиях и корректировать способ поведения в соответствии с новыми требованиями и целями [1].

Преимущества адаптивных систем автоматического управления:

1. **Повышение производительности.** Адаптивные системы могут динамически изменять параметры управления для достижения оптимальной производительности и эффективности процесса или системы. Они способны компенсировать изменения в производственных условиях и адаптироваться к различным режимам работы.

2. **Автоматическая настройка.** Адаптивные системы могут настраиваться самостоятельно в зависимости от предоставленной информации и новых условий. Это позволяет сократить время настройки и установки системы, а также снизить требования к квалификации оператора.

3. **Надежность и стабильность.** Адаптивные системы автоматического управления способны предотвращать сбои и чрезвычайные ситуации. Они могут адаптироваться к изменениям в работе оборудования, компенсировать отклонения и предотвращать неблагоприятные ситуации.

4. **Гибкость и масштабируемость.** Адаптивные системы управления позволяют быстро адаптироваться к изменениям в рабочих процессах и требованиям клиентов. Их можно легко масштабировать и модифицировать.

фицировать для поддержки новых режимов работы и добавления нового оборудования.

5. Оптимальное использование ресурсов. Адаптивные системы обеспечивают оптимальное использование таких ресурсов, как энергия, сырье и время. Они могут автоматически корректировать параметры управления, чтобы минимизировать потери и повысить эффективность.

Внедрение адаптивных цифровых систем автоматического управления (АЦСАУ) в систему водоподготовки позволит анализировать параметры воды в режиме реального времени и автоматически регулировать работу оборудования, что обеспечит более эффективное удаление загрязнений. Кроме того, АЦСАУ оптимизируют использование воды и химикатов, могут автоматически контролировать поток воды и регулировать дозировку реагентов в зависимости от текущих условий [2].

Стоит отметить, что АЦСАУ позволяют автоматизировать процессы в системе водоподготовки, снижая потребность в ручном управлении и мониторинге. Это может уменьшить вероятность человеческой ошибки и обеспечить более надежную и стабильную работу системы.

Такие системы управления включают в себя различные устройства и датчики, которые контролируют и отслеживают основные параметры водоподготовки. Например, они могут измерять уровень загрязнения воды, pH, температуру, давление и другие важные показатели. На основе полученных данных система управления принимает необходимые решения и регулирует работу оборудования для достижения оптимальных условий водоподготовки.

В целях успешного внедрения адаптивной системы управления водоподготовкой необходимо:

1. Определить цели и требования к системе водоподготовки, а также аспекты управления, которые необходимо автоматизировать.

2. Проанализировать текущую систему управления водоподготовкой. Определить ее сильные и слабые стороны.

3. Изучить возможности адаптивных цифровых систем управления, а также существующие технологии и программное обеспечение, которые можно применить в системе водоподготовки.

4. Разработать концепцию адаптивной цифровой системы управления с учетом требований системы водоподготовки. Рассмотреть возможность использования датчиков, контроллеров и алгоритмов управления для оптимизации процессов водоподготовки.

5. Протестировать и оптимизировать адаптивную цифровую систему управления, чтобы проверить ее работоспособность на практике, внести коррективы и добиться оптимальных результатов очистки воды.

6. Обеспечить надежность и безопасность адаптивной цифровой системы управления. Следует обратиться к экспертам или консультантам, чтобы свести к минимуму риск сбоев в работе системы.

7. Обучить персонал работе с адаптивной цифровой системой управления. Обеспечить обучение и поддержку сотрудников, чтобы они могли эффективно использовать систему и добиваться необходимых результатов очистки воды.

8. Провести мониторинг и техническое обслуживание системы.

Внедрение адаптивной цифровой системы управления в систему водоподготовки может значительно улучшить процессы очистки воды, оптимизировать энергоэффективность и снизить эксплуатационные расходы [3].

Однако разработка и внедрение адаптивных САУ могут быть сопряжены с трудностями. Важно провести предварительный анализ требований и потребностей, изучить возможности и ограничения существующего оборудования и адаптировать систему под них. Также необходимо обеспечить надежный сбор и обработку данных, разработать алгоритмы адаптации, протестировать и отладить систему. Эффективное функционирование адаптивной САУ может положительно сказаться на производительности, надежности и эффективности промышленного производства. Для достижения оптимальных результатов важно уделять должное внимание разработке и внедрению таких систем.

Современные требования к качеству очищенных сточных вод делают задачу управления процессом биологического удаления азота одной из самых актуальных в сфере водоотведения. Процесс нитри-денитрификации характеризуется значительной нестабильностью, нелинейностью и чувствительностью к внешним воздействиям, что требует разработки сложных САУ. В этом обзоре систематизированы и проанализированы современные подходы к созданию адаптивных систем управления процессом нитри-денитрификации.

Процесс нитри-денитрификации как объект управления имеет ряд специфических характеристик, которые усложняют применение традиционных методов регулирования [4]:

- нелинейность кинетических зависимостей, описываемых моделями Моно;

- значительные задержки при транспортировке;

- изменчивость параметров во времени под влиянием температуры, pH и состава сточных вод;

- взаимосвязь нескольких переменных состояния.

Эти особенности приводят к неэффективности систем управления с фиксированными настройками, что стимулирует разработку адаптивных систем.

Наиболее распространенным подходом является использование адаптивных пропорционально-интегрально-дифференцирующих регуляторов (ПИД-регуляторов). В таких системах коэффициенты усиления (K_p , K_i , K_d) автоматически корректируются в зависимости от изменений характеристик объекта управления. Есть два основных метода параметрической адаптации:

прямая, при которой параметры регулятора корректируются непосредственно на основе анализа ошибки управления;

косвенная, которая предполагает предварительное определение параметров объекта и последующую перенастройку регулятора.

Перспективным направлением является использование искусственных нейронных сетей для решения задач идентификации и управления. Многослойные перцептроны способны аппроксимировать нелинейные динамические характеристики объекта управления, что позволяет эффективно компенсировать изменения параметров процесса нитри-денитрификации [5].

Нейронные сетевые модели можно использовать как для определения параметров в системах с непрямой адаптацией, так и непосредственно в качестве нелинейных регуляторов.

Методы прогнозного управления (Model Predictive Control) все чаще применяются для управления процессами биологической очистки. Эти системы используют модель объекта для прогнозирования его поведения в течение заданного периода прогнозирования и расчета оптимальной последовательности управляющих воздействий.

Анализ позволяет выявить преимущества и недостатки различных архитектур систем управления:

1. Классические ПИД-регуляторы с фиксированными настройками просты в реализации, но не обеспечивают требуемого качества управления при значительных изменениях нагрузки.

2. Адаптивные ПИД-регуляторы демонстрируют более высокую производительность, но их эффективность существенно зависит от точности определения параметров объекта.

3. Системы с идентификацией на основе нейронных сетей обладают высокой точностью аппроксимации нелинейных зависимостей, но требуют значительных вычислительных ресурсов и большого объема обучающих данных.

4. Системы предиктивного управления обеспечивают наилучшее качество управления, но их практическая реализация затруднена из-за сложности разработки адекватной модели объекта.

Анализ современных исследований позволяет выделить следующие перспективные направления в разработке систем управления процессом нитри-денитрификации:

применение гибридных систем, сочетающих различные подходы к управлению;

использование методов глубокого обучения для более точной идентификации параметров;

разработку адаптивных систем, устойчивых к изменениям температуры;

создание интеллектуальных систем, способных к самонастройке и обучению в процессе работы.

Анализ данных подтверждает, что современные тенденции в управлении процессом нитри-денитрификации связаны с разработкой все более сложных адаптивных систем, способных эффективно функционировать в условиях нестабильности и неопределенности. Наиболее перспективными представляются гибридные архитектуры, сочетающие в себе преимущества различных подходов к управлению. Дальнейшее развитие этой области поможет повысить эффективность очистных сооружений и снизить эксплуатационные расходы.

Библиографический список

1. Попов Н.С., Пещерова О.В., Чан М.Т. О структуре системы управления процессом биологической очистки сточных вод // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2015. № 3 (57). С. 34–45.

2. Сеферян А.Е. Адаптивные системы управления водоподготовки очистных сооружений // Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 6-1 (37). С. 74–76.

3. Сидорова А.А., Малышенко А.М. Анализ эффективности алгоритмов автоматической настройки адаптивных промышленных ПИД-регуляторов // Известия Томского политехнического университета. 2011. Т. 318. № 5. С. 110–115.

4. Васильев Е.М. Адаптивные ПИД-регуляторы в системах с запаздыванием // Информационные технологии моделирования и управления. 2008. № 6 (49). С. 653–656.

5. Исаев Э.В., Михайлова О.В. Адаптивная коррекция коэффициентов ПИД-регулятора с применением нелинейных функций // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Новокузнецк, 20–21 мая 2025 года / под общ. ред. С.В. Коновалова. Новокузнецк: Сибирский государственный индустриальный университет, 2025. Вып. 29. С. 195–197.

MODERN METHODS OF ADAPTIVE CONTROL OF THE NITRI-DENITRIFICATION PROCESS AT WASTEWATER TREATMENT PLANTS

A.Yu. Eiternik, N.A. Malev

Abstract. *The article presents an analytical review of modern approaches to the management of biological nitrogen removal at wastewater treatment plants. Special attention is paid to adaptive control systems that effectively compensate for the non-stationarity and non-linearity of the nitri-denitrification process. Various control system architectures are analyzed: from classical PID controllers to systems with neural network identification and predictive control. The principles of indirect adaptation based on online identification of object parameters are considered. It is shown that combined systems combining adaptive algorithms with artificial intelligence methods demonstrate the greatest efficiency under conditions of changing loads and temperature conditions.*

Keywords: *biological wastewater treatment, nitrogen removal, nitri-denitrification, adaptive control, PID controller, artificial neural networks, predictive control, control system.*

Об авторах:

ЭЙТЕРНИК Адель Юрьевна – магистрант, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань. E-mail: adeleyternik@yandex.ru

МАЛЕВ Николай Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры приборостроения и мехатроники, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», Казань. E-mail: maleeev@mail.ru

About the authors:

EITERNIK Adel Yurievna – Master's Student, Kazan State Power Engineering University, Kazan. E-mail: adeleyternik@yandex.ru

MALEV Nikolay Anatolyevich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Instrument Engineering and Mechatronics, Kazan State Power Engineering University, Kazan. E-mail: maleeev@mail.ru