УДК 550.8.056

Елкин Иван Сергеевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Мешков Матвей Андреевич, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Новиков Михаил Александрович, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Ромашкин Тимофей Павлович, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Арефьев Егор Антонович, студент гр. ИИб-251, II курс
(КузГТУ, г. Кемерово)
Elkin Ivan Sergeevich, associate professor, Ph.D.
(KuSTU, Kemerovo)
Meshkov Matvey Andreyevich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Novikov Mikhail Alexandrovich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Romashkin Timofey Pavlovich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)
Arefiev Egor Antonovich, student, 2nd year
(KuSTU, Kemerovo)

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ГРЭС

OPTIMIZATION OF ENVIRONMENTAL MONITORING DATA PROCESSING SYSTEMS AT TPP

Аннотация. Проанализированы ключевые недостатки существующих систем автоматического контроля выбросов на угольных ГРЭС: метрологические погрешности, устаревшие аналоговые протоколы, отсутствие цифровой фильтрации и локального буфера. Предложен комплекс технических решений на базе периферийных вычислений. Локальная обработка на микроконтроллерах обеспечивает буферизацию и полностью исключает потери данных при сбоях сети. Применение каскадных цифровых фильтров с компенсацией температурного дрейфа, переход на защищенные интерфейсы RS-485/Modbus RTU и внедрение многоточечных усредняющих зондов решают проблемы промышленных помех и репрезентативности пробы. Показано, что предложенные решения позволяют снизить погрешность измерений, повысить доступность данных и исключить их потери при сбоях связи.

Ключевые слова: системы автоматического контроля выбросов; экологический мониторинг; периферийные вычисления; цифровая фильтрация; буферизация данных; пробоотборные зонды; ГРЭС.

Abstract. The article analyzes the key shortcomings of existing automatic emission monitoring systems at coal-fired thermal power plants: metrological errors, outdated analog protocols, lack of digital filtering, and absence of a local buffer. A set of technical solutions based on edge computing is proposed. Local processing on microcontrollers provides buffering and completely eliminates data loss in case of network failures. The use of cascaded digital filters with temperature-drift compensation, transition to secure RS-485/Modbus RTU interfaces, and implementation of multi-point averaging probes address issues related to industrial interference and sample representativeness. It is shown that the proposed architecture significantly reduces measurement errors, dramatically improves system availability, and ensures continuous environmental monitoring.

Keywords: automatic emission control systems; environmental monitoring; edge computing; digital filtering; multi-point sampling probes; data buffering; thermal power plant.

По российским правилам охраны окружающей среды стационарные источники на объектах I категории, которые оказывают значительное негативное воздействие на природу, должны быть оснащены автоматическими системами для измерения и учета выбросов загрязняющих веществ[1][2]. К таким объектам, в том числе, относятся угольные государственные районные электростанции мощностью от 250 МВт и более [1]. Системы автоматического контроля выбросов (САКВ) нужны для непрерывного мониторинга концентрации оксидов азота, диоксида серы, оксида углерода и твердых частиц с передачей этих данных в государственный фонд экологического мониторинга[3] [1–3].

Несмотря на законодательные требования и внедрение САКВ на ряде энергоблоков, у существующих систем обработки данных есть серьезные недостатки. Среди них большая погрешность измерений, вызванная неравномерным распределением температуры и концентраций в газоходах [1], низкая точность и ненадежность получаемых данных [4], дрейф показаний датчиков, а также использование устаревших протоколов (Modbus RTU) и аналоговых интерфейсов (4–20 мА), без встроенной аутентификации и шифрования [5]. Дополнительно проблема усугубляется тем, что локальное хранение данных обычно отсутствует, поэтому при сбоях связи они могут теряться [3, 6]. К тому же традиционная обработка чаще всего сводится к сравнению с предельно допустимыми выбросами, а статистические методы анализа почти не применяются [7].

Методология исследования включает анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы по системам автоматического контроля выбросов, изучение действующих нормативно-правовых требований к оснащению стационарных источников на объектах I категории, а также оценку практического опыта внедрения САКВ на угольных ГРЭС. В основе работы лежит ком-

[1] Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (ред. от 28.12.2025).
[2] Федеральный закон от 04.05.1999 № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (ред. от 28.12.2024).
[3] Постановление Правительства РФ от 29.05.2025 № 778 «Об утверждении требований к автоматическим средствам измерения и учета показателей выбросов…».

плексный подход, который помогает увидеть метрологические, технологические и информационные недостатки существующих систем [1, 2, 7], с обоснованием потенциальных решений для их устранения. Основным методом является сравнительный анализ архитектурных решений, протоколов передачи данных и алгоритмов обработки измерений.

Основная причина ошибок при непрерывном контроле выбросов заключается в том, что концентрация и температура в газоходе котла распределяются неравномерно. По данным исследований [1], относительная погрешность недостаточной представительности пробы $\sigma_{н.п}$ может достигать 10–40%, тогда как паспортная погрешность газоанализаторов составляет лишь 5–10%. На действующих ГРЭС выполнить требования ГОСТ Р ЕН 15259–2015 к прямым участкам газоходов (не менее пяти гидравлических диаметров выше измерительной плоскости) практически невозможно из-за плотной компоновки оборудования [1].

Даже если заранее откалибровать измерительное сечение, одноточечный пробоотборный зонд все равно не гарантирует, что проба будет отражать состав потока во всем диапазоне нагрузок котла. Для разных режимов представительная точка может находиться в различных местах сечения [1]. Помимо этого, существующие системы автоматического контроля выбросов не используют статистические методы для оценки точности и устойчивости процесса. Как показано в работе [7], если построить контрольные карты Шухарта по данным мониторинга выбросов оксида углерода и оксида азота, можно выявить статистически неуправляемое состояние процесса даже тогда, когда предельно допустимые выбросы формально не превышены. При этом дрейф нуля и чувствительности электрохимических и оптических датчиков между периодическими поверками остается без контроля, что приводит к накоплению систематической погрешности.

В обычных САКВ данные от датчиков к серверам чаще всего передаются по аналоговым линиям – через токовую петлю 4–20 мА – или по последовательным интерфейсам RS-232/RS-485 с использованием устаревших промышленных протоколов, в частности Modbus RTU. Такая архитектура создает несколько существенных ограничений. Во-первых, аналоговые каналы подвержены влиянию электромагнитных помех, из-за этого ухудшается соотношение сигнал/шум и растет погрешность измерений. Во-вторых, скорость последовательных линий ограничена, обычно от 9,6 до 115,2 кбит/с. Если датчиков много, опрос начинает сильно задерживаться, иногда на несколько секунд, это приводит к потере синхронности данных [9, 10].

Архитектура большинства САКВ является централизованной. Все данные с датчиков поступают на единый сервер, где происходит их обработка и хранение [2, 3]. Если сервер выходит из строя или теряется связь, сведения о выбросах могут быть безвозвратно утрачены, потому что полевые контроллеры, как правило, не имеют локального буфера для хранения данных [6]. Часто хранение результатов организовано в формате электронных таблиц, например в Microsoft Excel, без автоматического резервного копирования и защиты от несанкциони-

рованных правок. Это не отвечает требованиям к долгому хранению данных экологического мониторинга.

Периодическую поверку газоаналитического оборудования обычно делают один раз в год, используя внешние эталонные средства измерений [1]. Но в промежутках между поверками дрейф нуля и чувствительности датчиков, вызванный старением чувствительных элементов, загрязнением оптики и изменением условий эксплуатации, остается без контроля. В результате накапливается систематическая погрешность, которая может составлять 3–5% от верхнего предела измерений уже через несколько месяцев работы.

Дополнительной проблемой является человеческий фактор при ручной калибровке: неправильный ввод поправочных коэффициентов, использование просроченных газовых смесей или негерметичность соединений приводят к искажению результатов [1]. На большинстве угольных ГРЭС до сих пор не используются автоматические системы калибровки с регулярной продувкой эталонным газом, как того требуют новые нормативные документы для предиктивных систем [11]. Кроме того, действующий способ отбора проб через одноточечные зонды не позволяет получить представительную пробу при всех режимах работы котла, что ставит под сомнение корректность результатов поверки для рабочих режимов, отличных от режима аттестации [1].

Недостатки существующих САКВ, описанные в первом разделе, требуют системного подхода к их устранению. В этом разделе собран комплекс перспективных технических решений, основанных на современных достижениях в области цифровой обработки сигналов [12–14], информационно-измерительных технологий и методов организации вычислений [8]. Главные направления модернизации включают: внедрение периферийных вычислений для локальной обработки и буферизации данных [8], использование усредняющих многоточечных пробоотборных зондов [1], применение каскадных цифровых фильтров и алгоритмов компенсации дрейфа [12–14], а также переход на стандартизированные цифровые протоколы. Каждое из решений рассматривается с позиции сути нововведения, технической реализации и ожидаемого эффекта.

Вместо передачи всего потока данных на удаленный сервер первичная обработка выполняется на периферийных вычислительных узлах – промышленных контроллерах, например на базе микроконтроллера STM32F446, либо на специализированных платформах. На этом уровне организуют непрерывный опрос датчиков: электрохимических сенсоров SO_2 и NO_x, оптического пылемера, а также датчиков температуры и давления, с частотой локального опроса до 1 кГц. Здесь же выполняется начальная цифровая фильтрация (медианный фильтр, режекция 50 Гц), вычисляются 20-минутные усредненные значения концентраций и ведется буферное хранение данных в энергонезависимой памяти минимум за 30 суток. После восстановления связи накопленная информация автоматически уходит на сервер. В качестве примера можно привести модернизацию газоанализатора ДАФ-М-01 для контроля летучих органических соединений: вместо аналоговой схемы использовали цифровую платформу STM32F446 с подключением внешнего 16-битного АЦП, что позволило выполнить весь цикл цифровой обработки прямо в приборе [12, 13].

По данным экспериментального внедрения при одновременном доступе 200 устройств [8]:

- Успешность доступа к данным повышается с 72,05% до 89,5%;
- Среднее время отклика сокращается с 0,30 с до 0,15 с;
- Потери данных при сбоях связи полностью исключаются.

На Рис. 1 представлено сравнение успешности доступа для традиционного подхода и периферийных вычислений.

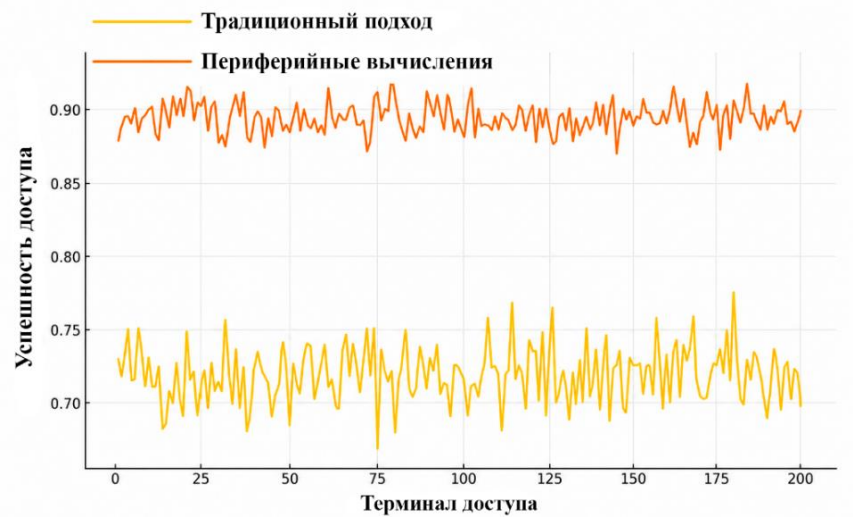

Рисунок 1. – Сравнение ошибок при расчете выбросов углекислого газа [8]

Использование цифровых фильтров и алгоритмов компенсации дрейфа является перспективным направлением решения проблемы. Сигналы, которые приходят от фотоионизационных, электрохимических и оптических датчиков, например ДАФ-М-01, а также от электрохимических сенсоров SO_2 и NO_x, содержат не только полезную низкочастотную составляющую, по которой видно, как меняется концентрация загрязняющих веществ, но и высокочастотные помехи, в том числе наводку от промышленной сети 50 Гц. Для их подавления в периферийном контроллере программно собирают цепочку цифровых фильтров: сначала ставят медианный фильтр с окном 3–5 отсчетов, который вырезает импульсные помехи, потом применяют режекторный фильтр 2-го порядка с полосой подавления 45–55 Гц для удаления сетевой наводки, а затем используют фильтр нижних частот Баттерворта 2-го порядка для окончательного сглаживания [14]. Вдобавок вводят автоматическую компенсацию температурного дрейфа на основе показаний встроенного датчика температуры и сохраненных калибровочных коэффициентов [12, 13]. Реализация возможна на стандартных 32-битных микроконтроллерах с тактовой частотой не ниже 80 МГц и не требует специализированных DSP [14].

Применение связки медианного и режекторного фильтра на газоанализаторе ДАФ-М-01 позволило повысить отношение сигнал/шум на 40 дБ и практически полностью исключить помехи с частотой 50 Гц [13, 14]. Использование цифровой фильтрации вместе с полиномиальной линеаризацией на модернизированном приборе снизило основную приведенную погрешность с ±2,5% до примерно 1,1% от верхнего предела измерений [12, 13]. Дрейф нуля электрон-

ного тракта сократился до менее 0,5% за 30 суток [13], это означает, что ручную калибровку можно делать гораздо реже. Эти показатели соответствуют требованиям ГОСТ Р 113.38.03-2021 к относительной погрешности газоанализаторов (нормировано ±10% для NO_x, SO_2, CO) и оставляют запас по точности при эксплуатации.

Оснащение датчиков цифровыми интерфейсами и переход на стандартизированные протоколы является одним из следующих вариантов решения проблемы. Вместо аналоговой передачи сигнала 4–20 мА или последовательного интерфейса RS-232, которые не обеспечивают синхронизации и диагностики, предлагается оснащать все газоаналитические датчики (пылемеры, электрохимические и оптические сенсоры) цифровым интерфейсом RS-485 с поддержкой протокола Modbus RTU. При модернизации существующих приборов в состав устройства добавляется модуль RS-485/Modbus RTU. Это позволяет передавать не только текущее значение концентрации, но и диагностическую информацию: температуру, статус калибровки, идентификатор прибора. На верхнем уровне (контроллер, шлюз) все датчики опрашиваются по единой двухпроводной линии, при этом каждому датчику присваивается уникальный адрес в сети. Для обеспечения совместимости с существующими SCADA-системами применяется транспортный уровень Modbus TCP через шлюз [2]. Такой подход устраняет разброс аналоговых каналов и потерю точности из-за помех по линии [10].

Предлагаемая архитектура сбора данных с датчиков, оснащенных интерфейсом RS-485/Modbus RTU, и последующей передачей на верхний уровень через промышленный контроллер показана на рис. 2.

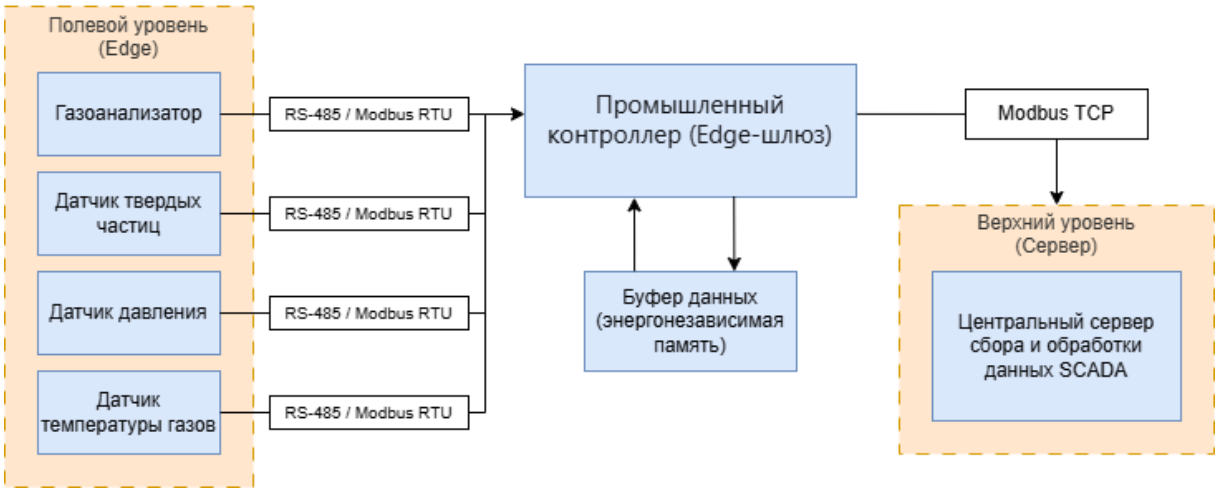

Рисунок 2. – Структура сети сбора данных на базе протоколов Modbus RTU и Modbus TCP

Таким образом, в работе рассмотрены главные недостатки существующих систем автоматического контроля выбросов на угольных ГРЭС: метрологические погрешности, обусловленные неравномерностью концентрационных и температурных полей в газоходах, дрейф датчиков, применение устаревших аналоговых интерфейсов 4–20 мА и последовательных протоколов без буферизации, а также отсутствие локального хранения и статистической обработки данных. Для устранения этих недостатков предложен комплекс технических

решений на базе периферийных вычислений: локальная обработка и буферизация данных на микроконтроллерах, каскадная цифровая фильтрация с температурной компенсацией, переход на цифровые интерфейсы RS-485/Modbus RTU с верхним уровнем Modbus TCP.

Список литературы

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 68–77. DOI: 10.1134/S0040363621110047.

2. Бернер Л.И., Толстых А.В., Зельдин Ю.М., Станиславчик К.В., Хадеев А.С., Котов В.В. Автоматизированная система контроля выбросов. Принципы построения, функции и реализация // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2021. № 1. С. 29–35. DOI: 10.47501/ITNOU.2021.1.29-35.

3. Панарин М.В., Рыбка Н.А., Маслова А.А., Сергеечев В.В., Загуменнов И.Ю. Оснащение стационарных источников вредных (загрязняющих) веществ автоматическими средствами контроля промышленных выбросов объектов 1-й категории // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2019. № 4(30). С. 12–20. DOI: 10.21685/2307-5538-2019-4-2.

4. Ding N., Xi Y., Jiang W., Li H., Su J., Yang S., Lie T.T. State-of-the-art carbon metering: Continuous emission monitoring systems for industrial applications // Heliyon. 2025. Vol. 11, iss. 3. e42308. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e42308.

5. Захаров А.А., Оленников А.А., Афсахов З.Н. Анализ угроз безопасности информационных потоков в автоматизированных системах управления технологическими процессами // Математическое и информационное моделирование : материалы Всерос. конф. молодых ученых, г. Тюмень, 22–30 апр. 2025 г. Вып. 23. — Тюмень : ТюмГУ-Press, 2025. — С. 306–310. — ISBN 978-5-400-01865-7.

6. Majanne Y., Korpela T., Judl J., Koskela S., Laukkanen V., Häyrinen A. Real Time Monitoring of Environmental Efficiency of Power Plants // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, no. 30. P. 495–500. DOI: 10.1016/J.IFACOL.2015.12.428.

7. Карпушенко И.С., Анискевич А.Д. Статистические методы обработки данных мониторинга выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух // Вестник Витебского государственного технологического университета. 2019. № 1(36). С. 138–145. DOI: 10.24411/2079-7958-2019-13615.

8. Bi S., Wang J., Song J., Li P., Li L. Dynamic Access Strategy of Power Terminals and Carbon Emission Tracking Method Based on Edge Computing // Journal of Smart Power and Energy Engineering. 2025.

9. Tang L., Xue X., Qu J., Mi Z., Bo X., Chang X., Wang S., Li S., Cui W., Dong G. Air pollution emissions from Chinese power plants based on the continuous emission monitoring systems network // Scientific Data. 2020. Vol. 7. Art. 325. DOI: 10.1038/s41597-020-00665-1.

10. ГОСТ Р 71507-2024. Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Термины и определения. – Моска: Российский институт стандартизации, 2024. 15 с.

11. ГОСТ Р 71984-2025. Системы автоматического контроля выбросов и сбросов. Системы автоматического контроля выбросов. Метрологическое обеспечение предиктивных систем. Методы и средства поверки. М.: Российский институт стандартизации, 2025. 12 с.

12. Соленков П.Н. Модернизация газоанализатора ДАФ-М-01: переход на цифровую платформу для повышения точности и функциональности // Молодой ученый. 2026. № 3(606). С. 35–36.

13. Соленков П.Н. Разработка цифровой системы обработки сигналов для модернизации газоанализатора ДАФ-М-01 // Молодой ученый. 2026. № 3(606). С. 36–38.

14. Подситкин К.С. Цифровые фильтры как программные методы устранения помех в газоанализаторах // Форум молодых ученых. 2020. № 6(46). С. 565–571.