

На правах рукописи

Шестаков Алексей Константинович



**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ СБОРА
И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ АЛЮМИНИЕВОГО
ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОБОЙНИКА И
СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

Петров Павел Андреевич

Официальные оппоненты:

Лавров Владислав Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», профессор;

Ремизова Ольга Александровна

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)», кафедра автоматизации процессов химической промышленности, доцент.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», г. Иркутск.

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 30 апреля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Процесс электролиза криолито-глиноземного расплава (КГР) относится к технологическим процессам, функционирующим в условиях неопределенности и агрессивной среды технологического процесса (высокая температура процесса, вредные выбросы, пыление исходного сырья). Существующая система управления технологическими процессами производства алюминия не обеспечивает оперативный контроль и корректировку технологических параметров процесса электролиза КГР таких как содержание глинозема, уровень электролита, контроль разрушения криолито-глиноземной корки перед процедурой питания оксидом алюминия системой автоматической подачи глинозема (АПП), а также автоматический контроль наблюдаемых выбросов в электролизном цехе. Интервалы между измерениями для данных параметров могут достигать нескольких суток, а для осуществления измерения требуется производить локальную разгерметизацию створчатых укрытий, что приводит к попаданию вредных веществ, таких как фтористый водород HF, твердые фториды (F_{hard}), диоксид серы SO_2 , смолистые вещества, бензопирен $C_{20}H_{12}$, углекислый газ CO_2 , пыль, перфторуглероды (ПФУ) CF_4 и C_2F_6 в атмосферу электролизного цеха.

Уровень электролита является одним из основных контролируемых технологических параметров, который влияет на стабильность технологического процесса и тепловой режим электролизной ванны. Превышение допустимого уровня электролита может приводить к растворению стальных ниппелей анододержателей и загрязнению первичного алюминия. Алгоритм питания, не учитывающий изменение высоты электролита более чем на 2 – 3 см, приводит к изменению КО (криолитового отношения). Отсутствие оперативной оценки содержания глинозема приводит к его снижению, к «голоданию» электролизной ванны с возникновением анодного эффекта, либо образованию осадка глинозема на подине. Укрытие электролизера является важным элементом для стабиль-

ности теплового режима электролизной ванны и способствует отводу газов, образующихся в результате технологического процесса. Таким образом, совершенствование системы автоматического управления технологическими параметрами процесса электролиза КГР, а именно оперативный контроль уровня электролита, содержания глинозема, а также контроль сплошности криолито-глиноземной корки является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение, развитие и усовершенствование процесса электролиза КГР и алгоритмов управления внесли известные российские ученые Федотьев П.П., Ветюков М.М., Беляев А.И., Поляков П.В., Калужский Н.А., Крюковский В.А., Минцис М.Я., Борисоглебский Ю.В., Галевский Г.В., Рапопорт М.Б., Сизяков В.М., Концур Е.П., Бажин В.Ю., Костюков А.А., Пискажова Т.В., Манн В.Х., Цыплаков А.М., Сиразутдинов Г.А., Громько А.И., а также зарубежные ученые Tabereaux A., Welch B., Dupuis M., Wojarevics V., Reverdy M., Wang J., Thonstad J., Kvande H., Grotheim H., Oye H. Проблемой контроля и управления технологическими параметрами процесса электролиза криолито-глиноземного расплава занимались отечественные и иностранные компании ВАМИ, ОК РУСАЛ, АО «Союзцветметавтоматика», «ТоксСофт», Alcoa, Alcan, Pechiney, Hydro Aluminium, Rio Tinto, Emirates Global Aluminium (EGA), Chinalco. Однако, разработке автоматических систем определения уровня электролита, оперативной оценке содержания глинозема и обнаружению наблюдаемых выбросов в атмосфере электролизного цеха уделено недостаточно внимания.

Содержание диссертации **соответствует паспорту научной специальности** по пунктам: п. 2. «Автоматизация контроля и испытаний», п. 5. «Научные основы, алгоритмическое обеспечение и методы анализа и синтеза систем автоматизированного управления технологическими объектами», п. 14. «Теоретические основы и прикладные методы резервирования контуров управления, повышения эффективности, надежности и живучести АСУ на этапах их разработки, внедрения и эксплуатации».

Объект исследования – автоматизированная система управления технологическим процессом электролиза криолито-глиноземного расплава.

Предмет исследования – алгоритмы контроля технологических параметров и управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава.

Цель работы – повышение эффективности автоматической системы сбора и обработки технологических параметров алюминиевого электролизера при использовании многофункционального пробойника и системы технического зрения для снижения частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов.

Идея – снижение частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов достигается за счет оперативного контроля дополнительных параметров (уровня электролита, преобладающих низких частот и наблюдаемых выбросов) на основе использования исполнительного устройства пробивки криолито-глиноземной корки системы автоматической подачи глинозема, снабженного датчиком положения для измерения уровня электролита, анализе низкочастотных шумов (амплитуды) напряжения методом быстрого преобразования Фурье для косвенной оценки и согласования текущего содержания глинозема, а также системы технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов вредных веществ.

Поставленная в диссертационной работе цель достигается посредством решения нижеуказанных **задач**:

1. Провести анализ существующих технических решений в области систем управления и контроля электролиза криолито-глиноземного расплава.

2. Разработать алгоритм определения уровня электролита в автоматическом режиме без локальной разгерметизации створчатых укрытий.

3. Обосновать схему дозирования глиноземом по алгоритму, в зависимости от уровня электролита и косвенной оценки содержания глинозема для ведения технологического процесса на низких значениях КО (2,2 – 2,4).

4. Разработать систему мониторинга с использованием технологии технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов в электролизном цехе.

Научная новизна работы:

1. Разработан метод измерения уровня электролита в автоматическом режиме с использованием модернизированного пневмоцилиндра АПГ с оптическим дальномером и измерительной цепью постоянного тока.

2. Разработан алгоритм питания электролизной ванны, учитывающий изменение значений уровня электролита при каждом цикле питания.

3. Разработана методика контроля разрушения корки криолито-глиноземного расплава, позволяющая поддерживать концентрацию глинозема, при которой не возникает анодный эффект.

4. Разработан алгоритм определения видимых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха с использованием системы технического зрения и нейронной сети.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработано модифицированное пробойное устройство АПГ с оптическим дальномером, позволяющее измерять уровень электролита в автоматическом режиме (патент на полезную модель №219339).

2. Обосновано уменьшение времени нахождения наконечника пробойного устройства АПГ в электролите для увеличения его срока службы.

3. Разработана система технического зрения для обнаружения видимых выбросов в электролизном цехе с целью улучшения качества воздуха, что приводит к увеличению скорости обслуживания персоналом (акт внедрения АО «СоюзЦМА» от 11.10.2022 г.).

Методология и методы исследования.

Исследования основывались на результатах анализа теоретических и экспериментальных данных в области управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава. Экспериментальные исследования по анализу шумов напряжения методом

быстрого преобразования Фурье для косвенной оценки содержания глинозема в криолито-глиноземном расплаве выполнены на установке для электролиза расплавов на базе научного центра «Проблем переработки минеральных и техногенных ресурсов». Для решения задачи распознавания наблюдаемых выбросов использовались современные методы обработки изображений при помощи нейронных сетей и программной библиотеки для машинного обучения TensorFlow на базе образовательного центра цифровых технологий Санкт-Петербургского горного университета.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Алгоритм питания электролизной ванны, использующий косвенную количественную оценку глинозема в криолито-глиноземном расплаве, основанную на анализе шумов напряжения и определении уровня электролита с относительной погрешностью, не превышающей 2%, позволяет поддерживать содержание глинозема на уровне 3,5 %, что приводит к снижению частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов.

2. Алгоритм обработки изображений, полученных системой технического зрения, использующий нейросетевую модель, позволяет обнаруживать нарушения сплошности криолито-глиноземной корки и локализовать место возникновения наблюдаемых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха с точностью не менее 94%.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается теоретическими и экспериментальными исследованиями с использованием установки для электролиза расплавов и системы АПГ, учитывающей изменение уровня электролита и осуществляющей косвенную оценку содержания оксида алюминия для расчета дозы подачи, а также воспроизводимостью результатов исследований.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на следующих семинарах и конференциях: XIX Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (апрель 2021

года, г. Санкт-Петербург); Всероссийский конкурс научных и проектных студенческих работ «Лаборатория РУСАЛа» 1 марта – 23 июня 2021 г.; The XVIII International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (май 2022 года, г. Санкт-Петербург); 5-й Международный семинар «Новые средства и системы автоматизации в горно-обогатительном производстве, металлургии и экологии» (октябрь 2022 года, г. Москва); The XIX International Forum-Contest of Students and Young Researchers «Topical Issues of Rational Use of Natural Resources» (май 2023 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе отечественной и зарубежной научной литературы, посвященной алгоритмам системы автоматической подачи глинозема, разработке модифицированного пробойного устройства АПГ с оптическим дальномером, анализе шумов напряжения для косвенной оценки содержания глинозема в криолито-глиноземном расплаве, а также системы мониторинга с использованием технологии технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов в электролизном цехе, проведение экспериментальных исследований, необходимых для подтверждения эффективности разработанных технологических решений, в подготовке публикаций по теме исследования.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 5 печатных работах, в том числе в 1 статье – в издании из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus, кроме того в 1 материалах конференции, индексируемых в международной базе данных Scopus. Подана 1 заявка на патент (патент на полезную модель № 219339 Российская Федерация, МПК C25C 3/14 (2006.01), опубл. 12.07.2023).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, с выводами по каждой из них, заключения и списка литературы, включающего 128 наименований. Работа изложена на 194 страницах машинописного текста, содержит 104 рисунка, 12 таблиц, 4 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность диссертационного исследования, поставлены цель и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимости работы, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные сведения о процессе электролиза КГР, конструкции электролизера с обожженными анодами (ОА), преимущества использования систем АПГ в алюминиевых электролизерах, основные направления развития алюминиевой промышленности.

Во второй главе представлена информация об электролизере как объекте управления, изложено описание функционала и алгоритмы существующих автоматических систем управления электролизным производством с указанием преимуществ и недостатков.

В третьей главе описана методика проведения экспериментальных исследований по электролизу КГР. Представлен анализ шумов напряжения методом быстрого преобразования Фурье, выделены преобладающие частоты в диапазоне 0 – 1 Гц и их амплитуды, позволяющие косвенно судить о текущем содержании глинозема в КГР. Исследована температурная зависимость удельного сопротивления анода, выполнен расчет скорости коррозии анода. Разработана автоматическая система измерения уровня электролита с использованием многофункционального пробойного устройства АПГ со встроенным малогабаритным оптическим дальномером.

В четвертой главе описана система технического зрения на основе нейронной сети для обнаружения наблюдаемых выбросов вредных веществ в электролизном цехе алюминиевого завода.

Приведен состав вредных веществ, выделяемых в атмосферу в результате процесса электролиза. Описана система сухой газоочистки выделяемых вредных веществ. Разработан и изготовлен лабораторный стенд для сбора данных для обучения нейронной сети, позволяющей обнаруживать наблюдаемые выбросы. Проведен выбор нейронной сети, обладающей наилучшими результатами для задач, связанных с распознаванием объектов по соотношению точности к быстродействию. Представлены результаты обучения и оценка точности обученной нейронной сети. Проработана схема расположения камер технического зрения в электролизном цеху с учетом габаритов электролизеров с ОА. Разработана распределенная архитектура системы обработки информации для системы технического зрения. Подобрано оборудование для обработки видеопотока на предприятии. Рассчитана стоимость внедрения разработанной автоматической системы мониторинга наблюдаемых выбросов вредных веществ на примере Хакасского алюминиевого завода. Представлены преимущества разработанной системы мониторинга по сравнению с системами-аналогами.

В заключении приведены обобщенные выводы в соответствии с поставленными целью и задачами.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Алгоритм питания электролизной ванны, использующий косвенную количественную оценку глинозема в криолито-глиноземном расплаве, основанную на анализе шумов напряжения и определении уровня электролита с относительной погрешностью, не превышающей 2%, позволяет поддерживать содержание глинозема на уровне 3,5 %, что приводит к снижению частоты анодных эффектов и числа выбросов перфторуглеродов.

В системе $\text{Na}_3\text{AlF}_6\text{-Al}_2\text{O}_3$ изменение содержания глинозема от 5% до 1% приводит к изменению краевых углов θ смачивания электролитом поверхности угольных электродов. При уменьшении содержания глинозема краевой угол смачивания увеличивается и при значении угла более 90° электролит плохо смачивает

поверхность электрода. В результате этого образующиеся в процессе электролиза КГР пузырьки анодных газов легко оттесняют электролит от анода, на поверхности электрода образуется газовая пленка, которая приводит к росту напряжения на электроде и возникновению анодного эффекта. Отрыв пузырей газовой пленки перфторуглеродов наряду с парциальным давлением отходящих газов CO_2 и CO по реакции Белла – Будуара от поверхности электрода приводит к возникновению низкочастотного шума (амплитуды) напряжения в диапазоне 0 – 1 Гц. Использование метода быстрого преобразования Фурье (БПФ) для спектрального анализа сигнала напряжения с электролизера позволяет косвенно определить содержание глинозема в расплаве. В ходе экспериментов по электролизу КГР установлены преобладающие низкие частоты и их амплитуды, характерные для следующих значений содержания глинозема в расплаве (см. рисунок 1):

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 0,5\%$ основной пик находится вблизи 0,05 Гц, амплитуда составляет 0,003 В;

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1,0\%$ основной пик находится вблизи 0,05 – 0,1 Гц, амплитуда составляет 0,0016 В;

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 1,5\%$ основной пик находится вблизи 0,25 – 0,3 Гц, амплитуда составляет 0,0015 В;

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2,0\%$ частоты равномерно распределены в диапазоне 0,2 – 0,6 Гц, амплитуда составляет 0,009 – 0,011 В;

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2,5\%$ основной пик находится на частоте 0,35 – 0,4 Гц, амплитуда составляет 0,002 В;

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3,0\%$ основной пик находится на частоте 0,5 Гц, амплитуда составляет 0,002 В;

$C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 3,5\%$ основной пик находится в диапазоне 0,95 – 1 Гц, амплитуда составляет 0,00055 В.

При низком содержании глинозема происходит коалесценция пузырьков, т.е. слияние и увеличение их в размере, при этом их отрыв от поверхности электрода происходит реже, вследствие чего преобладающие частоты ниже и имеют большую амплитуду. При большом газовом слое резко увеличивается сопротивление в МПР. При высоких значениях содержания глинозема пузырьки

имеют меньший размер, отрываются от поверхности чаще, поэтому преобладающие частоты выше, а их амплитуда ниже.

Уровень электролита относится к основным технологическим параметрам, так как высота уровня электролита влияет на частоту возникновения анодных эффектов. В настоящее время измерение осуществляется вручную при помощи измерительного щупа раз в сутки. При низком уровне электролита подаваемый глинозем не успевает растворяться и опускается в слой расплавленного алюминия. Основной причиной снижения уровня электролита является испарение фторида алюминия.

Повышение уровня электролита сопровождается увеличением его объема и при использовании систем АПП с фиксированной дозой глинозема может приводить к снижению его содержания в расплаве. Кроме того, высокий уровень электролита способствует растворению криолито-глиноземной корки, а также стальных ниппелей анододержателей, что приводит к загрязнению первичного алюминия.

Известные средства и способы автоматического измерения уровня жидкости не могут быть использованы для измерения уровня электролита из-за высокой температуры процесса электролиза 960 °С, высокого уровня запыленности глиноземом внутри электролизера, а также переменного магнитного поля, возникающего из-за МГД-нестабильности электролизной ванны.

Для решения задачи измерения уровня электролита было предложено использовать компактный оптический дальномер, установленный в «мертвый объем» пневмоцилиндра (т.е. в объем между крышкой пневмоцилиндра и поршнем в его крайнем положении, см. рисунок 2), источник излучения оптического дальномера в этом случае направляется на поршень пневмоцилиндра. Температура в области верхней крышки пневмоцилиндра составляет 110 – 120 °С, что позволяет снизить технические требования, предъявляемые к датчику. Внутри пневмоцилиндра минимальное содержание глиноземной пыли, что позволяет эффективно осуществлять измерения величины выдвижения штока пробойного устройства.

На конструкцию пневмоцилиндра с установленным внутри компактным оптическим дальномером получен патент на полезную модель №219339 «Устройство для пробивки криолито-глиноземной корки алюминиевого электролизера».

Определение уровня электролита происходит по сигналу с дополнительной измерительной цепи постоянного тока и значениям, получаемым с оптического датчика. Конструкция системы автоматического определения уровня электролита представлена на рисунке 2.

Алгоритм работы многофункционального пробойного устройства АПГ предусматривает возврат штока пневмоцилиндра по сигналу, поступающему с дополнительной электрической измерительной цепи при регистрации касания электролита наконечником пробойного устройства. Исследование показало, что предложенный алгоритм приводит к увеличению срока службы наконечника до 2 раз по сравнению со стандартным исполнением пневмоцилиндра АПГ. Кроме того, контроль разрушения криолито-глиноземной корки, реализуемый системой, позволяет снизить вероятность возникновения анодных эффектов вследствие нарушения подачи глинозема в электролит.

Изменение режима разрушения криолито-глиноземной корки реализовано за счет использования двухступенчатого давления в пневматической системе АПГ. Первоначально разрушение осуществляется при пониженном давлении (3 атм), а при отсутствии разрушения корки система автоматически переключается на повышенное давление (6 атм), обеспечивая надежную работу системы АПГ при одновременном снижении расхода сжатого воздуха.

Для подтверждения выбора малогабаритного оптического дальномера проведен эксперимент по оценке статистической ошибки датчика при рабочих температурах 125 °С (см. рисунок 3). Эксперимент представлял собой нагрев пневмоцилиндра АПГ до 125 °С с установленным внутри оптическим дальномером и датчиком температуры, измеряющим температуру внутри пневмоци-

линдра. Контроль наружной температуры пневмоцилиндра осуществлялся с использованием инфракрасного тепловизора. Пневмоцилиндр был подключен к пневматической системе с давлением 6 атм. В ходе эксперимента от ПЛК на пневматический распределитель подавались сигналы, имитирующие различные режимы срабатывания пневмоцилиндра при разрушении криолито-глиноземной корки, а также различные уровни электролита. По результатам обработки данных погрешность измерения оптического дальномера не превышала 2%.

С учетом измеренного значения уровня электролита выполняется перерасчет дозы глинозема (1), а также интервала питания (2):

$$A = M_{el} \cdot \frac{\Delta C}{100} = (\rho \cdot L_b \cdot B_b \cdot h_{el}) \cdot \frac{\Delta C}{100}, \text{ кг} \quad (1)$$

где A – разовая доза глинозема, загружаемая в электролизер, кг;
 ΔC – отклонение содержания глинозема от заданного уровня C , % (мас.);

M_{el} – масса электролита в ванне, кг;

ρ – плотность электролита, г/см³;

L_b – длина электролизной ванны, м;

B_b – ширина электролизной ванны, м;

h_{el} – высота слоя электролита, м.

$$T = \frac{A}{P} = \frac{A}{q \cdot I \cdot \eta_t \cdot \frac{9}{60}}, \text{ с} \quad (2)$$

где T – период питания ванны глиноземом;

A – разовая доза глинозема, загружаемая в электролизер, кг;

P – скорость потребления глинозема в электрохимической реакции, кг/мин;

q – электрохимический эквивалент алюминия, равный 0,336 кг/кА·ч;

I – сила тока, кА;

η_t – выход по току, ед.;

9 – удельный расход глинозема, кг/кг Al;

60 – число минут в часе.

Таким образом, алгоритм работы многофункционального

пробойного устройства с установленным внутри оптическим дальномером, представленный на рисунке 4, позволяет поддерживать содержание глинозема в расплаве в диапазоне 3-4% за счет использования информации об уровне электролита и результатов спектрального анализа шумов напряжения.

2. Алгоритм обработки изображений, полученных системой технического зрения, использующий нейросетевую модель, позволяет обнаруживать нарушения сплошности криолито-глиноземной корки и локализовать место возникновения наблюдаемых выбросов вредных веществ в атмосфере электролизного цеха с точностью не менее 94%.

Процесс электролиза КГР сопровождается выделением вредных веществ, таких как твердые фториды, перфторуглероды, плавиковая кислота, смолистые соединения, содержащие канцерогенные полиароматические углеводороды. Предприятия по производству первичного алюминия активно развивают и используют системы сухой газоочистки для уменьшения вредного влияния на окружающую среду.

Разгерметизация электролизеров может производиться как планоно – в рамках регламентного обслуживания, так и в результате аварийных ситуаций (неустановленная боковая створка электролизера вследствие нарушения регламентных операций, нарушения сплошности криолито-глиноземной корки из-за низкого уровня электролита). В указанных случаях вредные выбросы либо минуют систему сухой газоочистки, либо вызывают сбой в ее работе, в том числе развитие продолжительного анодного эффекта.

Для своевременного обнаружения и устранения наблюдаемых выбросов вредных веществ в электролизном цехе обосновано использование системы технического зрения. Для поиска и локализации наблюдаемых выбросов предложено использование нейросетевых моделей. В результате проведенных исследований была выбрана сверточная нейронная сеть (CNN – Convolutional Neural Net) типа FPN (Feature Pyramid Net – функциональная пирамидальная сеть), использована модель обнаружения: `ssd_res-`

net50_v1 с разрешением фильтра 640x640. Критериями выбора являлись способность распознавания протяженных аморфных объектов и оптимальное соотношение точности к быстродействию. Реализация алгоритмов выполнена на платформе машинного обучения с открытым исходным кодом TensorFlow на языке программирования Python.

Для синтеза данных, необходимых для обучения нейронной сети, разработан лабораторный стенд (см. рисунок 5), представляющий собой масштабную модель электролизера, портативный генератор дыма и камеру на штативе. В результате экспериментальных исследований была получена выборка из 1000 фотографий с имитацией промышленных условий. Варьировались следующие параметры:

- концентрация дыма от $0,5 \text{ г/м}^3$ (редкий дым) до 3 г/м^3 (густой дым);
- размер облака от $2,5 \times 10^{-3} \text{ м}^2$ до $2,5 \times 10^{-1} \text{ м}^2$;
- освещенность от 20 до 6000 лк;
- изменение положения макета на 10° .

Из собранных фотографий 80% использовалось для обучения нейронной сети, 20% для тестирования. Для обучающей выборки произведена разметка фотографий с наблюдаемыми выбросами с присвоением им класса «Emissions».

Для обучения нейронной сети использовался ноутбук с видеокартой NVIDIA GeForce RTX 3070 для ноутбуков 105 W с 8 гигабайтами видеопамяти. Для обработки видеопотока на предприятии используется одноплатный компьютер NVIDIA Jetson Nano, позволяющий одновременно обрабатывать до 18 видеопотоков разрешением 720p и частотой 30 к/с.

Обученная нейронная сеть позволяет определить локализацию наблюдаемых выбросов (см. рисунок 6), т.е. определить номер электролизера с выбросами. Пример распознавания выбросов в электролизном цехе представлен на рисунке 7.

Графики потерь при классификации, локализации, регуляризации и полных потерь при 20 000 итераций обучений представлены на рисунках 8 – 11 соответственно.

Для вычисления функции потери используется среднеквадратическая ошибка, вычисляемая по (3):

$$E_i = \sum \frac{1}{2} \cdot (target_j - output_j)^2 \quad (3)$$

где *target* – это действительное значение;

output – предсказания.

Функция полных потерь рассчитывается по (4):

$$E_t(step) = E_c(step) + E_l(step) + E_r(step) \quad (4)$$

где E_c – ошибка при классификации объекта;

E_l – ошибка при локализации объекта на изображении;

E_r – ошибка регуляризации.

Согласно результатам эксперимента, на последнем шаге обучения потери по классификации составили 0,061, это означает, что обученная нейронная сеть достаточно точно определяет наблюдаемые выбросы на изображениях.

Обученная нейронная сеть обладает общей точностью 94,6% (по классификации 95,9%, по локализации 98,7%), что подтверждает возможность ее использования для распознавания наблюдаемых выбросов опасных веществ в электролизном цеху. Кроме того, разработана распределенная архитектура системы обработки информации с использованием технического зрения (см. рисунок 12), обладающая рядом преимуществ перед клиент-серверной структурой существующих систем, выполняющих такие же задачи по определению наблюдаемых выбросов вредных веществ в электролизном цехе. Преимущество заключается в эффективной передаче информации между сервером и клиентом без потерь информации, с повышением отказоустойчивости системы технического зрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлено решение актуальной научной задачи – повышение эффективности управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава за счет снижения числа анодных эффектов на основе разработки и использования технических и программных решений для системы АПГ.

По результатам выполнения диссертационной работы достигнуты следующие результаты:

1. На основе анализа существующих технических решений в области управления процессом электролиза криолито-глиноземного расплава выявлены актуальные проблемы управления содержанием глинозема в электролите. Для снижения числа анодных эффектов целесообразно контролировать разрушение криолито-глиноземной корки, определять уровень электролита, а также производить анализ низкочастотных шумов напряжения на электролизере.

2. Для контроля уровня электролита в автоматическом режиме без локальной разгерметизации створчатых укрытий электролизера предложен способ и разработана конструкция пневмоцилиндра АПГ со встроенным «мертвый» объем цилиндра оптическим датчиком, в конструкцию электролизера добавлена измерительная электрическая цепь постоянного тока, один контакт которой подключен на электрически изолированный пробойник АПГ, а второй контакт – к блоку электролизера. Данное решение позволяет регистрировать момент касания электролита наконечником пробойника и определять уровень расплава в электролизной ванне. Выполнена оценка погрешности метода измерения.

3. Проведен анализ низкочастотных шумов напряжения электролизера методом быстрого преобразования Фурье, определены преобладающие частоты в диапазоне 0 – 1 Гц и их амплитуды, соответствующие содержанию глинозема от 0 до 3,5%. На основании косвенных значений текущего содержания глинозема и определенном уровне электролита производится расчет дозы глинозема.

4. Разработана система мониторинга с использованием технического зрения для обнаружения наблюдаемых выбросов в электролизном цехе. В рамках предложенной системы выполнены сбор и разметка изображений алюминиевого электролизера с наблюдаемыми выбросами, обучена нейронная сеть, подтверждена точность системы технического зрения. Разработаны схема установки

системы технического зрения в электролизном цехе и архитектура системы обработки информации.

Перспективным направлением для дальнейших исследований является создание автоматической системы управления для электролизера с вертикально расположенными электродами.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. **Шестаков, А.К.** Состояние производства первичного алюминия на начало 2020 г. / **А.К. Шестаков**, Р.М. Садыков, П.А. Петров // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 7 (97) Часть 1. – С.114-119, <https://doi.org/10.23670/IRJ.2020.97.7.017>

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования (Scopus):

2. **Shestakov, A.K.** Automatic System for Detecting Visible Emissions in a Potroom of Aluminum Plant Based on Technical Vision and a Neural Network / **A.K. Shestakov**, P.A. Petrov, M.Y. Nikolaev // Metallurgist. – 2023. – Vol. 66. – P. 1308–1319, <https://doi.org/10.1007/s11015-023-01445-z>

3. Petrov, P.A. Use of multifunctional crust breaker and machine vision system for acquisition and processing of aluminium reduction cell data / P.A. Petrov, **A.K. Shestakov**, M.Yu. Nikolaev // Tsvetnye Metally. – 2023. – №4. – P. 45-53, <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.06>

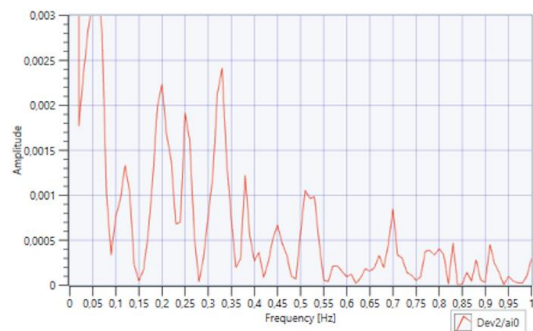
4. Oksengoyt, E.A. Modern equipment by Soyuzsvetmetavtomatika for detecting aerosols and spills of harmful pollutants / E.A. Oksengoyt, N.A. Kunitskiy, P.A. Petrov, **A.K. Shestakov** // Tsvetnye Metally. – 2023. – №4. – P. 61-65, <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.04.08>

Публикации в прочих изданиях:

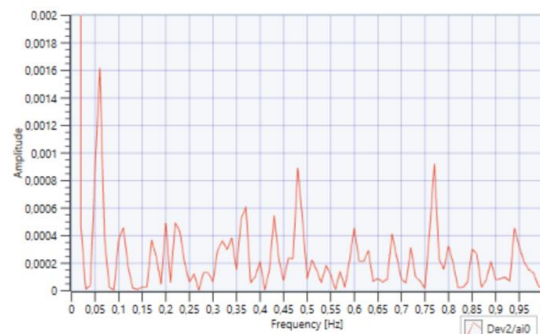
5. **Shestakov, A.K.** Multifunctional crust breaker for automatic alumina feeding system of aluminum reduction cell / **A.K. Shestakov**, R.M. Sadykov, P.A. Petrov // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 266 – P. 1-12, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126609002>

Патент на полезную модель:

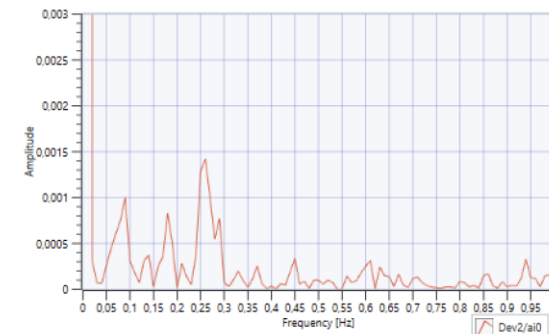
6. Заявка на патент РФ № 2023109899/05 Устройство для пробивки криолитоглиноземной корки алюминиевого электролизера; заявл. 19.04.2023 / Шестаков А.К., Петров П.А., Николаев М.Ю. Заявитель СПГУ. (Патент на полезную модель № 219339 Российская Федерация, МПК С25С 3/14 (2006.01), опубл. 12.07.2023).



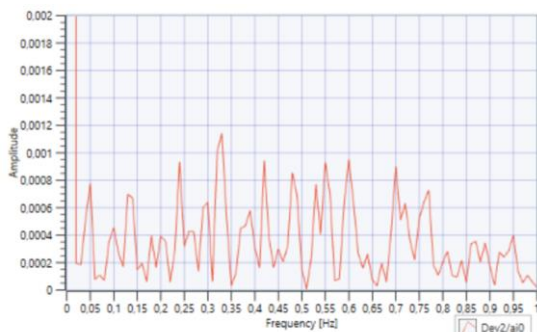
а)



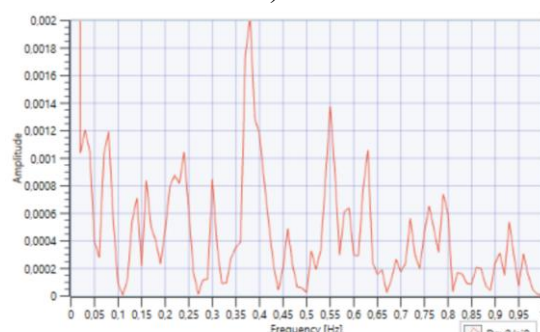
б)



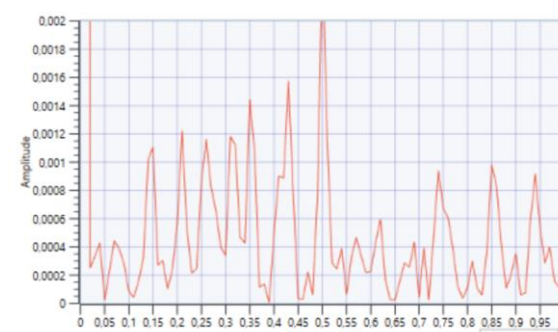
в)



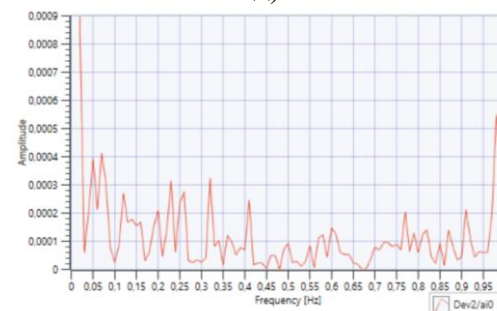
г)



д)



е)



ж)

Рисунок 1 – Графики частотного анализа сигнала напряжения лабораторного электролизера:

- а) $C_{Al_2O_3} = 0,5\%$ основной пик находится вблизи 0,05 Гц, амплитуда составляет 0,003 В;
- б) $C_{Al_2O_3} = 1,0\%$ основной пик находится вблизи 0,05 – 0,1 Гц, амплитуда составляет 0,0016 В;
- в) $C_{Al_2O_3} = 1,5\%$ основной пик находится вблизи 0,25 – 0,3 Гц, амплитуда составляет 0,0015 В;
- г) $C_{Al_2O_3} = 2,0\%$ частоты равномерно распределены в диапазоне 0,2 – 0,6 Гц, амплитуда составляет 0,009 – 0,011 В;
- д) $C_{Al_2O_3} = 2,5\%$ основной пик находится на частоте 0,35 – 0,4 Гц, амплитуда составляет 0,002 В;
- е) $C_{Al_2O_3} = 3,0\%$ основной пик находится на частоте 0,5 Гц, амплитуда составляет 0,002 В;
- ж) $C_{Al_2O_3} = 3,5\%$ основной пик находится в диапазоне 0,95 – 1 Гц, амплитуда составляет 0,00055 В.

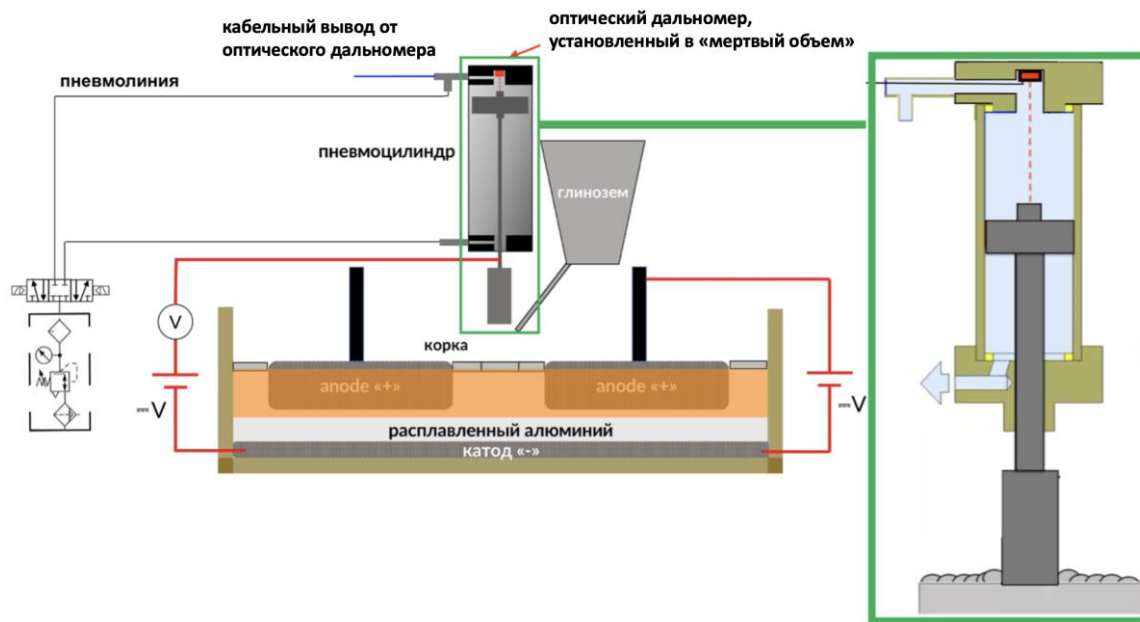


Рисунок 2 – Схема многофункционального пробойного устройства

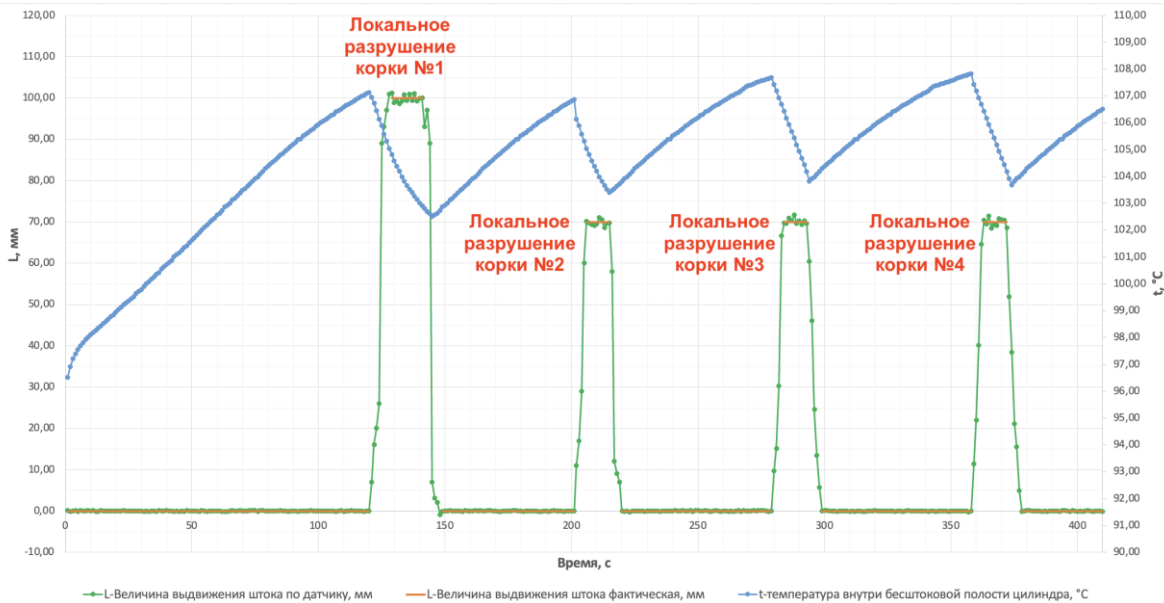


Рисунок 3 – Сравнение значений величины выдвижения штока пробойного устройства, измеренных оптическим дальномером при нагреве до 125 °С, с действительными значениями (фрагмент эксперимента)

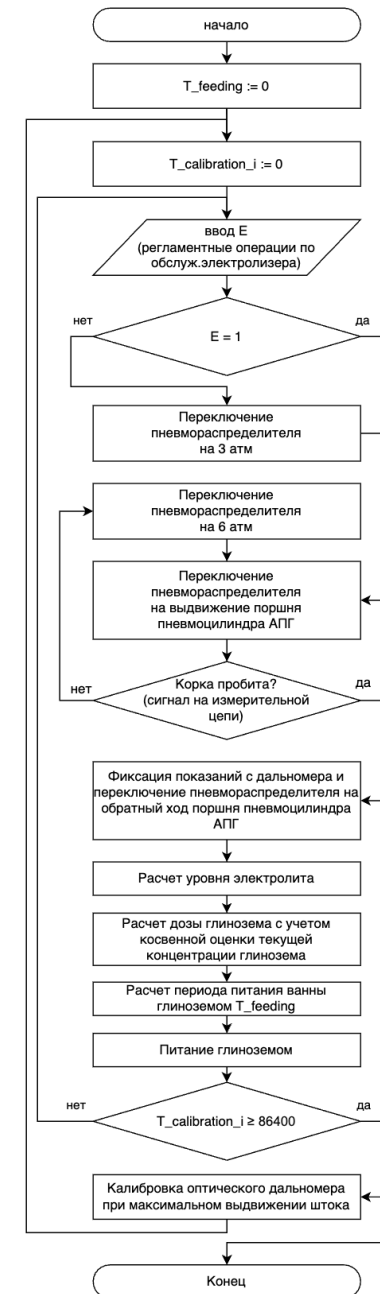


Рисунок 4 – Алгоритм работы пробойного устройства

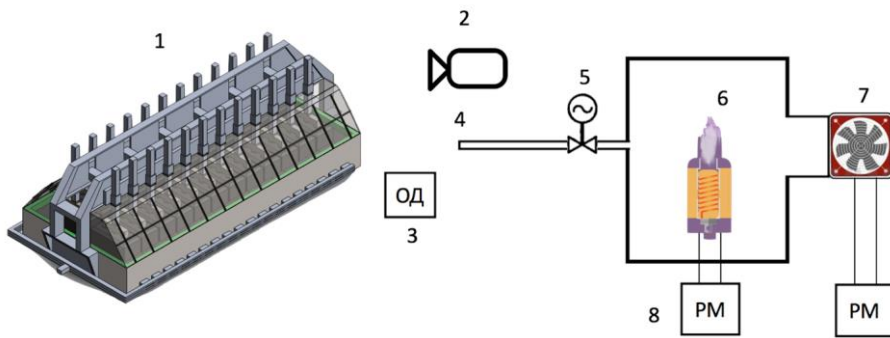


Рисунок 5 – Схема лабораторного стенда. 1 – макет электролизера;
 2 – камера; 3 – оптический датчик; 4 – гибкая резиновая трубка;
 5 – регулируемый вентиль; 6 – металлическая спираль с фитилем;
 7 – электрический вентилятор; 8 – регулятор мощности

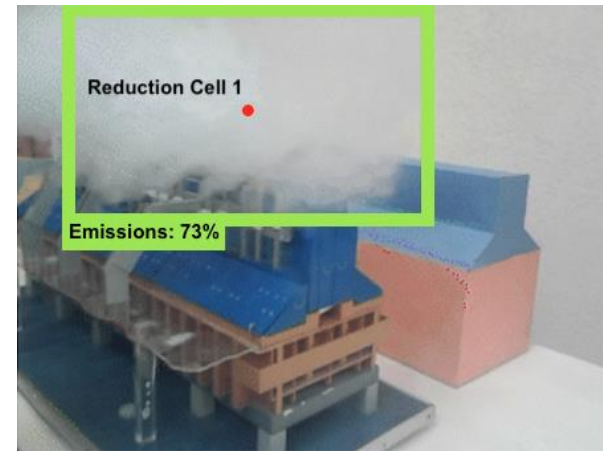


Рисунок 6 – Определение локации задымления (определение номера электролизера с нарушенной системой газоочистки) на масштабных моделях электролизера при помощи нейронной сети, исполняемой на NVIDIA Jetson Nano



Рисунок 7 – Распознавание видимого выброса в реальном электролизном цехе при помощи нейронной сети, исполняемой на NVIDIA Jetson Nano

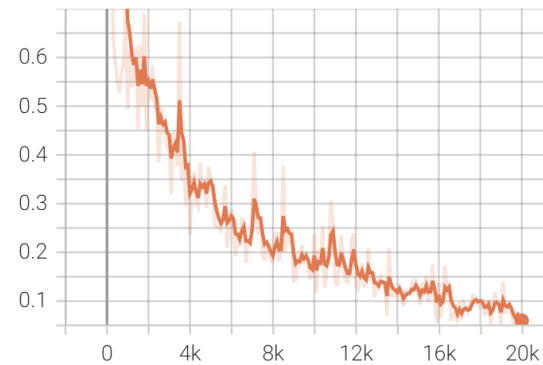


Рисунок 8 – График потерь при классификации (classification loss) во время обучения нейронной сети

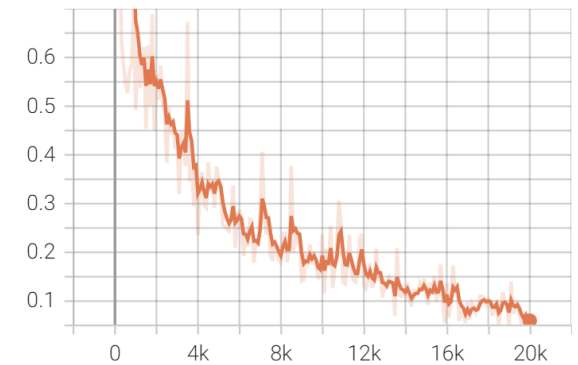


Рисунок 9 – График потерь при локализации (localization loss) во время обучения нейронной сети

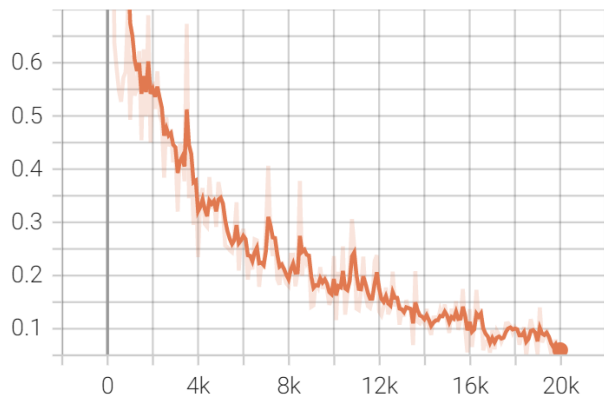


Рисунок 10 – График потерь при регуляризации (regularization loss) во время обучения нейронной сети

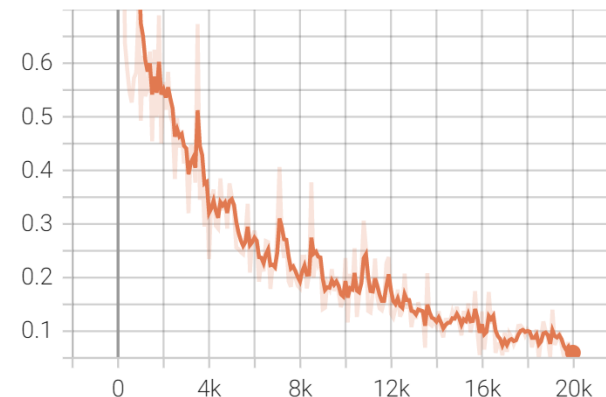


Рисунок 11 – График полных потерь во время обучения нейронной сети

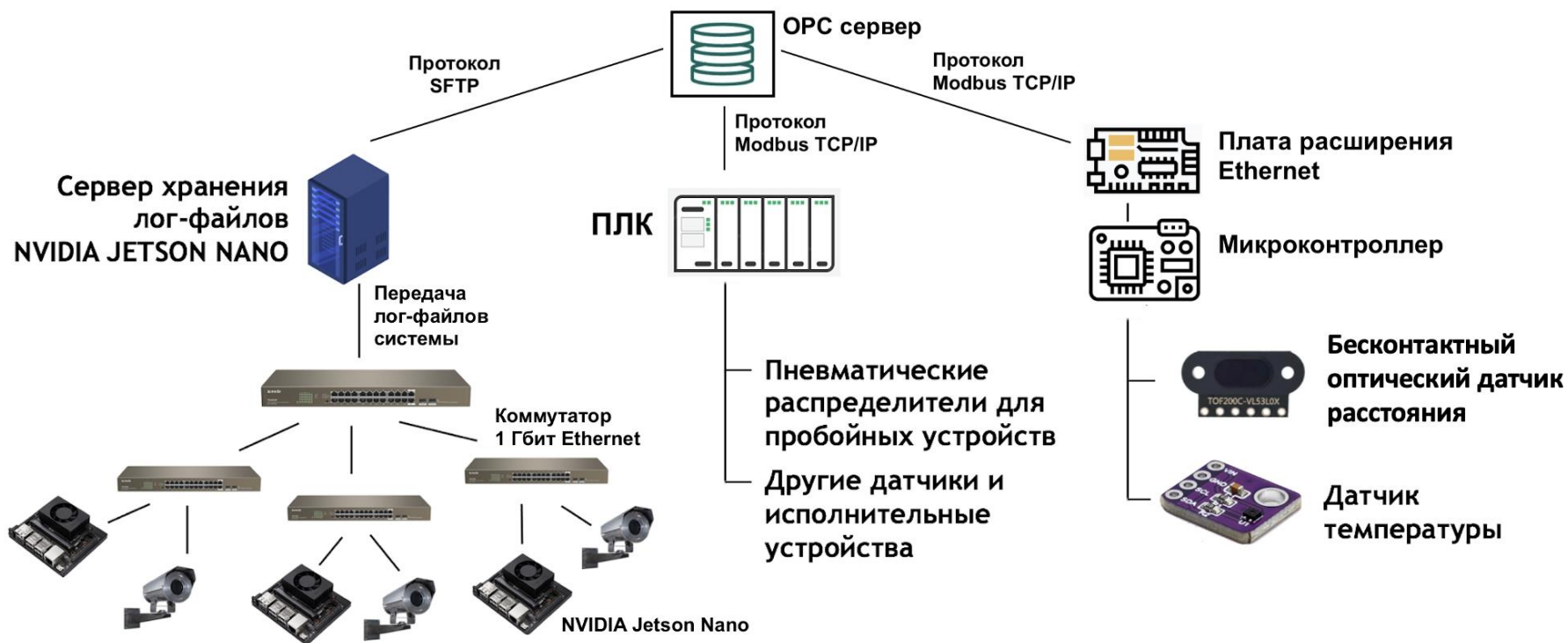


Рисунок 12 – Обобщенная структурная схема системы мониторинга электролизера