

Научная статья

УДК 621.398

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-12-21

Растворова Ирина Ивановна*, Труфанов Сергей Александрович

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II

* для корреспонденции: sergeitrufanov73@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА БУРОВОЙ УСТАНОВКИ****Информация о статье**

Поступила:

04 апреля 2025 г.

Одобрена после

рецензирования:

30 июня 2025 г.

Принята к печати:

01 августа 2025 г.

Опубликована:

28 августа 2025 г.

Ключевые слова:системы контроля,
управление,
оптимизация,
автоматизация,
алгоритм**Аннотация.**

Требования к надежности и безопасности работы электротехнических комплексов буровых установок, эксплуатация которых происходит в суровых условиях, непрерывно растут. Именно поэтому актуальным является проблема совершенствования методов контроля и диагностики данных систем, которые позволяют снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций и повысить эффективность их работы. Статья посвящена разработке модели системы контроля и диагностики электротехнических комплексов буровых установок, основанной на применении современных беспроводных телекоммуникационных технологий, которые не требуют дополнительной прокладки кабелей связи между различными элементами буровой установки и пунктом управления. Ключевыми компонентами системы являются интегрированные датчики с телекоммуникационными модулями, обеспечивающие передачу данных в реальном времени на персональный компьютер буровищика для последующего анализа. В работе проведен анализ существующих методов диагностики, предложена архитектура системы управления, позволяющая оценивать параметры системы в реальном времени. Проведены лабораторные эксперименты для проверки адекватности модели, а также испытания на реальном оборудовании для верификации полученных результатов. Для анализа данных предлагается использовать алгоритмы машинного обучения, чтобы повысить скорость выявления оптимальных параметров и аномального поведения бурового оборудования. Основные результаты работы включают разработку архитектуры системы контроля и диагностики бурового комплекса, а также разработку алгоритма обработки данных с датчика температуры в режиме реального времени. Результаты исследования могут быть адаптированы для внедрения в различных типах буровых работ и условиях эксплуатации с целью минимизации простоев и оптимизации затрат на обслуживание буровых установок.

Для цитирования: Растворова И.И., Труфанов С.А. Моделирование системы контроля и диагностики электротехнического комплекса буровой установки // Горное оборудование и электромеханика. 2025. № 4 (180). С. 12-21. DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-12-21, EDN: HZZWVH

Введение

Буровые комплексы являются сложными технологическими сооружениями, эффективность и безопасность работы которых в основном зависит от качественного управления и обслуживания электротехнического оборудования, входящего в состав установки (системы управления, электроприводы, генераторы, распределительные сети и другие). Все эти элементы подвержены различным видам неисправностей, например, застреванию бурового инструмента и снижению скорости вращения буриль-

ной колонны, которое приводит к остановке технологического процесса и значительным финансовым потерям из-за простоев и затрат на ремонт.

Данные проблемы возникают, потому что традиционные методы диагностики, основанные на периодическом обслуживании электротехнического комплекса буровой установки, не всегда позволяют оперативно обнаружить возникающие неисправности. В связи с этим актуальным является необходимость разработки систем непрерывного мониторинга и диагностики, которые будут в режиме ре-

ального времени отслеживать состояние оборудования и ход технологического процесса, чтобы предупредить возможные отказы или избыточное потребление энергии.

В сфере разработки систем контроля буровыми установками перспективным направлением является внедрение современных телекоммуникационных технологий для осуществления с высокой точностью дистанционного мониторинга оборудования без необходимости прокладки дополнительных проводов. Внедрение беспроводных технологий в совокупности с инструментами машинного обучения для анализа получаемых данных позволит повысить эффективность управления электротехническим комплексом, тем самым увеличив уровень выработки и снизив риски чрезвычайных ситуаций.

Целью данной работы является моделирование системы удаленного мониторинга электротехнических комплексов буровых установок, основанной на использовании современных телекоммуникационных технологий. В рамках исследования решаются такие задачи, как проектирование архитектуры системы, выбор и интеграция аппаратных и программных средств, а также тестирование системы в лабораторных условиях.

Для разработки системы предлагается использовать различные автономные датчики (тока, давления, температуры, вибрации и др.), со встроенными модулями беспроводной передачи данных. Сенсоры планируется соединить топологией «Звезда», используя популярные в автоматизированных системах управления технологических процессов (АСУ ТП) телекоммуникационные технологии передачи данных, такие как LoRaWAN и Bluetooth, которые обеспечивают надежную передачу данных на большие расстояния при низком энергопотреблении. Вся информация будет поступать на вычислительную машину (персональный компьютер) для ее дальнейшего хранения и анализа.

Методы

Оптимальный режим эксплуатации бурового инструмента предполагает достижение максимальных скоростей бурения при минимальных затратах мощности в пределах допустимого износа. Скорость реакции на изменения буровой ситуации напрямую влияет на достижение наилучших результатов [1, 2]. В публикации [1] говорится, что частота изменений во многом зависит от «типа, конструкции бурового инструмента, оборудования, области их применения и других производственных факторов».

Рациональное управление бурением возможно при реализации предложенной модели системы контроля и диагностики электротехнического комплекса в режиме реального времени. Предполагается, что система будет включать «вычислительную машину (компьютер управления) и связанные с ней датчики» [1]. Данные о взаимодействии бурового инструмента с забоем непрерывно попадают на персональный компьютер бурильщика, который в свою очередь выполняет их преобразование, обработку и анализ. На основе полученных результатов

формируются рекомендации для оператора с представленными оптимальными параметрами режима бурения для текущего состояния [3, 4]. Реализация данных параметров направлена на обеспечение максимальной механической скорости бурения при минимизации затрат энергии, что способствует увеличению уровня выработки скважины, а также уменьшению времени простоев [5, 6, 7].

Для реализации подобной системы на практике требуется разработка архитектуры системы дистанционного мониторинга и диагностики, интегрированной в инфраструктуру буровой установки. Кроме этого, необходимо разработать специализированное программное обеспечение, способное преобразовывать получаемые сигналы от датчиков и выводить обработанные данные на пульт управления.

Разработка архитектуры системы контроля и диагностики электротехнического комплекса буровой установки представляет собой многоуровневую структуру, включающую аппаратные и программные компоненты, объединенные с использованием телекоммуникационных технологий. Основная цель архитектуры — обеспечить непрерывный мониторинг состояния оборудования, оперативное выявление неисправностей и передачу данных для анализа и принятия решений [8, 9, 10].

Модель системы контроля и диагностики включает три основных уровня:

1. Аппаратный уровень:

- Датчики и сенсоры для сбора данных (ток, напряжение, температура, вибрация, давление и т. д.).

- Микроконтроллеры для контроля управляющими устройствами.

- Средства связи (проводные и беспроводные протоколы связи).

2. Программный уровень:

- Программное обеспечение для сбора и обработки данных.

- База данных для хранения исторических данных.

- Алгоритмы машинного обучения для анализа и прогнозирования.

3. Пользовательский интерфейс:

- Визуализация данных в реальном времени (графики, диаграммы, карты состояния).

- Уведомления о неисправностях, аномальных значениях и рекомендации по их устранению.

Для эффективного мониторинга электротехнических комплексов буровых установок необходимо обеспечить сбор данных с ключевых узлов и оборудования буровой установки (Рис. 1):

1. Скважинные сенсоры: Данные устройства монтируются в составе нижней части бурильной колонны или непосредственно к самой колонне, обеспечивая сбор важной информации о характеристиках породы, состоянии ствола скважины и параметрах процесса бурения. К ним относятся датчики нагрузки на забой, давления, температуры, пространственного расположения, поворота, вибрации и другие [3].

2. Поверхностные сенсоры: Эти устройства располагаются на элементах буровой установки и фиксируют такие показатели, как усилие на крюке, момент вращения, нагрузку на долото (WOB), характеристики бурового раствора и интенсивность потока жидкости. Также используются датчики тока и напряжения для контроля нагрузки, датчики давления и расхода для контроля гидравлических систем, датчики температуры и вибрации на насосах и компрессорах [3].

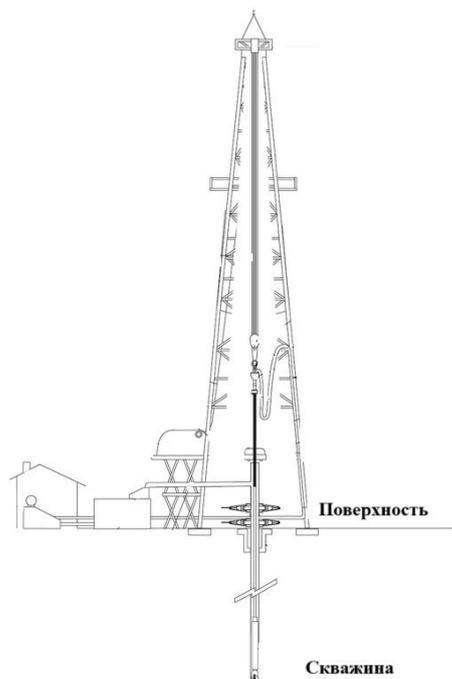


Рис. 1. Конструкция буровой установки
Fig. 1. Drilling rig design

Буровые установки работают в экстремальных условиях, что требует надежной защиты используемой аппаратуры, особенно в скважине [11, 12, 13]. Основные меры включают:

1. Защита от механических воздействий:

- Корпуса датчиков из ударопрочных материалов.
- Амортизаторы и виброизоляция для снижения воздействия вибраций.

2. Защита от климатических условий:

- Влагозащищенные и пыленепроницаемые корпуса (стандарт IP67/IP68).
- Термостойкие материалы для работы в условиях высоких и низких температур [14, 15, 16].

Аппаратный уровень

Для успешного мониторинга и оперативного управления данными в режиме реального времени требуется применение современных и надежных технологий передачи информации и связи. На Рис. 2 представлена архитектура системы мониторинга электротехнического комплекса буровой установки.

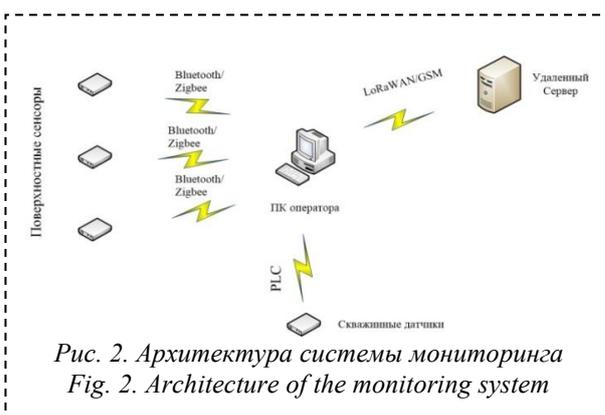


Рис. 2. Архитектура системы мониторинга
Fig. 2. Architecture of the monitoring system

В качестве ключевых технологий на поверхности можно использовать беспроводные сети, такие как, LoRaWAN, Bluetooth и Zigbee, которые обладают достаточной дальностью, скоростью передачи данных и обладают низким энергопотреблением, помимо этого они дают ряд преимуществ по сравнению с проводными технологиями [17, 18, 19]:

- Упрощение монтажа и снижение затрат. Беспроводные технологии устраняют необходимость прокладки сложных кабельных систем, что значительно сокращает время и затраты на разрывтывание системы контроля и диагностики;

- Гибкость и масштабируемость. Беспроводные сети позволяют легко добавлять новые датчики или изменять конфигурацию системы мониторинга без необходимости масштабных переделок инфраструктуры. Это делает систему более адаптивной к изменяющимся условиям бурения;

- Передача данных в режиме реального времени. Беспроводные технологии, такие как Bluetooth, Zigbee обеспечивают мгновенную передачу данных с датчиков на буровой установке в центр управления для дальнейшего анализа [20, 21];

- Снижение рисков и повышение безопасности. Отсутствие кабелей снижает риск повреждения оборудования и возникновения аварийных ситуаций, связанных с обрывом или коротким замыканием проводки. Это особенно важно в условиях экстремальных температур, вибраций и других неблагоприятных факторов, характерных для буровых установок [12, 13];

- Энергоэффективность. Многие беспроводные датчики и устройства обладают низким энергопотреблением и могут работать от автономных источников питания. Это делает их идеальным решением для удаленных и сложно доступных объектов.

Поскольку вся информация с датчиков собирается в одном месте, в пункте управления, для ее дальнейшего анализа и обработки, то сеть датчиков будет связана по топологии «Звезда», как показано на Рис. 2.

Использование беспроводных технологий для связи с забоем буровой скважины, который может находиться на глубине нескольких километров, становится крайне затруднительным, поскольку радиоволны будут сильно затухать из-за поглощения горными породами, что приведет к потере дан-

ных. Прокладывание дополнительного кабеля для передачи данных с забоя скважины также является невозможным, потому что существует риск заклинивания оборудования и обрыва кабеля. Поэтому для передачи данных со скважинных датчиков в режиме реального времени предлагается использовать технологию Power-line communication (PLC) и передавать информацию по питающему грузонесущему кабелю [22, 23, 24]. Для этого необходимо исследовать влияние помех от электротехнического оборудования на передачу данных.

Для передачи данных о процессе бурения на удаленный сервер, расположенный в десятках километров от буровой установки, для хранения и использования для прогнозирования бурения других скважин можно использовать технологии LoRaWAN и GSM [20, 25], позволяющие передавать информацию на большие расстояния [26, 27].

Преимущества предложенной архитектуры:

1. Масштабируемость: Система может быть легко расширена для контроля дополнительных параметров или оборудования без необходимости прокладки дополнительных кабелей.

2. Гибкость: Поддержка различных телекоммуникационных технологий позволяет адаптировать систему к различным условиям эксплуатации.

3. Надежность: Использование современных алгоритмов диагностики и прогнозирования повысит точность выявления неисправностей и поможет принимать решения по управлению буровым комплексом.

4. Экономическая эффективность: Снижение затрат на техническое обслуживание и увеличение уровня выработки за счет подбора оптимальных параметров и минимизации простоев оборудования.

Разработанная архитектура системы контроля и диагностики электротехнического комплекса буровой установки обеспечивает высокий уровень автоматизации и надежности, что делает ее применимой в промышленных условиях.

Программный уровень

Вся информация с сенсоров на буровом оборудовании передается по беспроводным каналам связи в центр управления, где они обрабатываются на персональном компьютере оператора и сохраняются в базе данных для дальнейшего хранения и передачи на общий удаленный сервер. Перед анализом необходимо провести предварительную обработку данных, включающую фильтрацию шумов, устранение пропусков и аномалий [28, 29]. Затем выполняется нормализация, масштабирование и преобразование данных в формат, подходящий для использования алгоритмов машинного обучения [30].

С помощью правильно разработанных алгоритмов можно предсказывать отказы оборудования, оценивать производительность технологического процесса, обнаруживать отклонения от нормального поведения, подбирать оптимальные параметры работы электротехнического комплекса.

Для оптимизации процесса бурения можно применять алгоритмы машинного обучения, основанные на применении математических моделей

определения оптимальных параметров бурения. Выбор того или иного алгоритма зависит от конкретной задачи, типа данных и требований к точности и скорости обработки [31, 32, 33].

Так, например, при помощи алгоритма обучения с подкреплением можно научить систему корректировать параметры на основе получаемых данных. Или, используя метод линейной регрессии, можно установить зависимости между одной или несколькими переменными, интересующими нас (целевыми параметрами), и одной или несколькими независимыми переменными (предикторами), что позволит предсказывать значения целевой переменной на основе значений предикторов [33, 34].

Так или иначе, существует множество различных алгоритмов для машинного обучения, которые можно применять для обработки поступающих данных с датчиков на буровой установке, что позволит значительно улучшить процесс бурения, делая его более эффективным и безопасным.

Далее представлен небольшой алгоритм на языке python, который будет имитировать работу датчика температуры, непрерывно генерируя значения, и выводить их на экран пользователя в виде графика, выделяя аномальные значения красными точками.

На Рис. 3 представлена функция, которая будет генерировать данные.

```
def generate_data():
    timestamp = datetime.now()
    temperature = round(random.uniform(20, 25))
    return timestamp, temperature
```

Рис. 3. Функция для генерации случайной температуры

Fig. 3. Function for generating random temperature

```
def update_data():
    global data
    while True:
        timestamp, temperature = generate_data()
        new_data = pd.DataFrame({'timestamp': [timestamp], 'temperature': [temperature]})
        with lock:
            data = pd.concat([data, new_data], ignore_index=True)
            if len(data) > 100: # Ограничение размера данных
                data = data.iloc[-100:]
            # Выявление аномалий
            data['anomaly'] = model.fit_predict(data[['temperature']])
            data['anomaly'] = data['anomaly'].apply(lambda x: 1 if x == -1 else 0)
```

Рис. 4. Функция для генерации случайной температуры

Fig. 4. Function for generating random temperature

Данная функция имитирует работу датчика температуры, возвращая текущее время и случайное значение температуры в диапазоне 20–25°C.

На Рис. 4 представлена функция для обновления данных в реальном времени.

Функция циклично запускает и добавляет новые данные в глобальный DataFrame data. Также она использует алгоритм Isolation Forest для обнаружения аномальных значений. Для удобства был ограничен размер данных (для более удобного отображения на графике).

И наконец, на Рис. 5 представлена функция, которая будет рисовать и обновлять график температуры, с непрерывно поступающими данными:

Результаты исследования

Для проверки качества передачи данных с датчиков в условиях, имитирующих реальную работу электротехнического оборудования, включая оцен-

ку устойчивости к помехам, точность данных и задержки передачи были взяты датчики температуры, давления, тока, вибрации. Сенсоры были установлены на электротехническое оборудование в лаборатории (электродвигатели, трансформаторы, генераторы), расположенные на разных расстояниях в одном помещении. В ходе экспериментов данные с датчиков без проблем передавались на принимающий ПК при помощи технологии Bluetooth, с минимальными задержками и искажениями. Технология PLC также успешно показала свою работоспособность при передаче данных на расстояние около 100 метров между двумя PLC-модемами, подключенными к промышленной сети.

```
def update_graph(n):
    with lock:
        # Создание графика
        fig = go.Figure()
        # Добавление линии температуры
        fig.add_trace(go.Scatter(
            x=data['timestamp'],
            y=data['temperature'],
            mode='lines+markers',
            name='Температура',
            line=dict(color='blue')
        ))
        # Добавление аномалий
        anomalies = data[data['anomaly'] == 1]
        fig.add_trace(go.Scatter(
            x=anomalies['timestamp'],
            y=anomalies['temperature'],
            mode='markers',
            name='Аномалии',
            marker=dict(color='red', size=15)
        ))
        # Настройка макета
        fig.update_layout(
            title='Мониторинг температуры',
            xaxis_title='Время',
            yaxis_title='Температура (°C)',
            showlegend=True
        )
    return fig
```

Рис. 5. Функция для генерации случайной температуры

Fig. 5. Function for generating random temperature

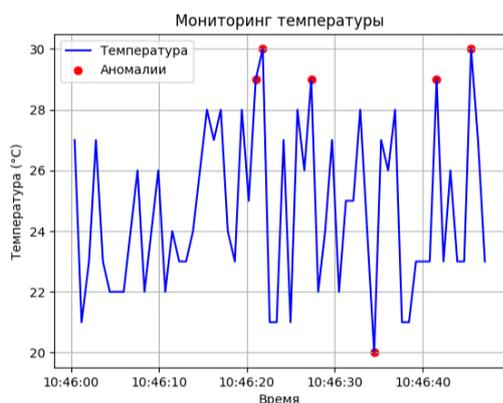


Рис. 6. График мониторинга температуры в режиме реального времени

Fig. 6. Real-time temperature monitoring graph

Работа алгоритма обработки и вывода данных показана на Рис. 6. На нем отображается поведение температуры, которое обновляется в режиме реального времени, а также аномалии, выделенные красными маркерами. По аналогии можно выводить на пульт оператора все интересующие параметры, а также сигнализировать о критичном состоянии оборудования.

Обсуждение

По результатам исследования можно утверждать, что разработанную архитектуру системы контроля и диагностики можно интегрировать и исследовать ее эффективность в реальных условиях буровых работ в Антарктиде. В настоящее время электромеханическая буровая установка, применяемая российской экспедицией в Антарктиде, испытывает дефицит электронных измерительных устройств, что существенно снижает производительность и скорость бурения. В суровых условиях Антарктиды эффективность буровых работ напрямую зависит от точности измерений, которая, в свою очередь, определяется качеством электронных систем, задействованных в процессе. Современные измерительные приборы, собранные в единую систему мониторинга всего электротехнического комплекса, позволят минимизировать ошибки, вызванные климатическими изменениями.

Для проверки работоспособности и эффективности системы в суровых условиях Антарктиды предлагаются следующие рекомендации для дальнейших исследований:

1. Дальнейшие испытания при генераторе помех: Использование генераторов сигналов для создания контролируемых помех (узкополосных, широкополосных, импульсных) для проверки устойчивости беспроводных стандартов перед электромагнитными помехами.
2. Испытания передачи данных с забоя скважины по грузонесущему кабелю при помощи PLC. Исследование влияния помех от электротехнического оборудования на передачу данных.
3. Разработка методов анализа данных, основанных на алгоритмах машинного обучения, на языке программирования Python, а также программного обеспечения, в котором будут визуально отображаться обработанные данные.

Выводы

В ходе исследования была построена архитектура системы контроля и диагностики электротехнического комплекса буровой установки на основе современных телекоммуникационных технологий.

Показан простой алгоритм машинного обучения для обработки данных с датчика температуры и выявления аномальных значений. Анализируя ток и вибрации аналогичным способом, можно обнаруживать аномалии, связанные с износом подшипников или дисбалансом ротора, а также на основе данных о нагрузке на буровую колонну динамически регулировать мощность оборудования.

При корректной реализации разработанная система способна существенно повысить ключевые показатели эффективности и уровень безопасности в нефтегазовой сфере, создавая условия для реали-

зации инновационных подходов к оптимизации производственных процессов и увеличению уровня выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попова М. С., Нескоромных В. В., Зотов З. Г., Лиу Б. Современные основы автоматизации управления процессом алмазного бурения // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 6. С. 103–112. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4080. EDN GBNNRS.
2. Neskromnyh V. V., Popova M. S., Golovchenko A. E., Petenev P. G., Baochang L. Method of drilling process control and experimental studies of resistance forces during bits drilling with PDC cutters // Journal of Mining Institute. 2020. № 245(1). Pp. 539–546. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.5.
3. Калдарбек М. А., Шарданова У. Б., Каюмов К. Г. Моделирование и оптимизация системы управления буровой скважиной // Вестник науки. 2024. Т. 1. № 6(75). С. 1642–1662. EDN TUVDLC.
4. Yang Zhou, Xin Chen, Min Wu, Weihua Cao. A novel optimization method for geological drilling vertical well // Information Sciences. 2023. Vol. 634. Pp. 550–563. ISSN 0020-0255. DOI: 10.1016/j.ins.2023.03.082.
5. Tretyakov N., Cherepovitsyn A., Komendantova N. Technology Predictions for Arctic Hydrocarbon Development: Digitalization Potential. In: Schaumburg H., Korablev V., Ungvari L. (eds) Technological Transformation: A New Role For Human, Machines And Management. TT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 157. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-64430-7_21.
6. Samylovskaya E. A., Makhovikov A. B., Lutonin A. S., Medvedev D. A., Kudryavtseva R. A. Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience Resources. 2022. № 3. DOI: 10.3390/resources11030029.
7. Sterkhov I. A. Kraev N. A., Denisova O. V. Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (El-ConRus). 2021. Pp. 164–167. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396635.
8. Naveen Erasala, David C. Yen. Bluetooth technology: a strategic analysis of its role in global 3G wireless communication era // Computer Standards & Interfaces. 2022. Vol. 24. Iss. 3. Pp. 193–206. ISSN 0920-5489, DOI: 10.1016/S0920-5489(02)00018-1.
9. Исмоилов И. И., Грачева Е. И. Повышение управляемости энергетическими системами и улучшение качества электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2022. Т. 14. № 1(53). С. 3–12. EDN FEVHHI.
10. Абдуллазянов Э. Ю., Грачева Е. И., Альзаккар А., Низамиев М. Ф., Шумихина О. А., Valtchev S. Прогнозирование и анализ электропотребления и потерь электроэнергии на промышленных объектах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. № 24(6). С. 3–12. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.
11. Васильев Н. И., Дмитриев А. Н., Блинов П. А. Бурение глубокой скважины на российской антарктической станции Восток, Вестник ОНЗ РАН. 2012. № 4, NZ2001. DOI: 10.2205/2012NZ000111.
12. Большунов А. В., Игнатъев С. А., Горелик Г. Д., Крикун Н. С., Васильев Д. А., Ракитин И. В., Шадрин В. С. Комплексные исследования снежно-фирновой толщи в районе российской антарктической станции Восток // Записки Горного института. 2025. EDN KBAZNU.
13. Bolshunov A. V., Vasilev D. A., Ignatiev S. A., Dmitriev A. N., Vasilev N. I. Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air [Механическое бурение ледников с очисткой забоя сжатым воздухом] // Led i Sneg. 2022. № 62(1). Pp. 35–46. DOI: 10.31857/S2076673422010114.
14. Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu, Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring // Petroleum Science. 2023. Vol. 20, Iss. 2. Pp. 1169–1182. ISSN 1995-8226. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.011.
15. Lee Ian, Hawley Robert, Bernsen Steven, Campbell Seth, Clemens-Sewall David, Gerbi Christopher, Hruby Kate. A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska // Journal of Glaciology. 2019. № 66. Pp. 1–9. DOI: 10.1017/jog.2019.84.
16. Xiaojun Shi, Heping Xie, Cong Li, Jianan Li, Guikang Liu, Zhenxi You, Mingzhong Gao, Performance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2025. Vol. 17. Iss. 2. Pp. 877–896. ISSN 1674-7755. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.012.
17. Lazarev A. S., Perkov N. A. Technologies for building modern wireless local area networks // Generation of the Future: The View of Young Scientists-2022: collection of scientific articles of the 11th International Youth Scientific Conference. Kursk, November 10-11, 2022. Vol. 3. Pp. 223–226. Kursk : South-West State University, 2022. EDN PAYIYB.
18. Yamanov A., Alevsky D., Plekhanov A. Local area network in automated process control systems: from cable communication lines to wireless ZigBee channels // First Mile. 2013. Vol. 35. № 2. Pp. 046–053. EDN PZMVWT.
19. Artyushenko V. M., Korchagin V. A. Analysis of wireless data exchange technologies in automation systems of life support of industrial and office premises // Electrical and information complexes and systems. 2010. Vol. 6. № 2. Pp. 18–24. EDN MDXIBR.
20. Cardeira C., Colombo A., Schoop R. Analysis of wireless technologies for automation networking, Editor(s): D. T. Pham, E. E. Eldukhri, A. J. Soroka. Intelligent Production Machines and Systems // Elsevier Science Ltd. 2006. Pp. 499–504. ISBN

9780080451572. DOI: 10.1016/B978-008045157-2/50088-2.

21. Ryabtseva V. E. Interfaces for data transmission in automated systems for monitoring and accounting of electric power // Problems of theory and practice of modern science: Collection of scientific articles. Scientific editor T. A. Kolesnikova. Moscow : Pero Publishing House, 2018. Pp. 119–122. EDN YRLEQP.

22. Korotchenko F., Natashina N. Creation of a data transmission network based on PLC technology // Control Engineering Russia. 2019. № 6 (84). Pp. 64–68. EDN AKQZAU.

23. Rinaldi S., Ferrari P., Flammini A., Rizzi M., Sisinni E., Vezzoli A. Performance analysis of power line communication in industrial power distribution network // Computer Standards & Interfaces. 2015. Vol. 42. Pp. 9–16. ISSN 0920–5489. DOI: 10.1016/j.csi.2015.03.003.

24. Liangbin Xu, Changzan Liu, Ling Yang, Yang Zhao, Kangquan Ming, Chenlu Zhang, Bowen Ren, Bo Dang. Long-term downhole monitoring and controlling production from wells based on high-temperature DC power line communication // Energy Reports. 2022. Vol. 8. Supplement 4. Pp. 175–186. ISSN 2352-4847, DOI: 10.1016/j.egy.2022.01.142

25. Penã Queralta J., Gia T.N., Zou Z., Tenhunen H., Westerlund T. Comparative Study of LPWAN Technologies on Unlicensed Bands for M2M Communication in the IoT: beyond LoRa and LoRaWAN // Procedia Computer Science. 2019. Vol. 155. Pp. 343–350. ISSN 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.049.

26. Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT // ICT Express. 2017. Vol. 3. Iss. 1. Pp. 14–21. ISSN 2405-9595. DOI: 10.1016/j.icte.2017.03.004.

27. Hicham Klaina, Imanol Picallo Guembe, Peio Lopez-Iturri, Miguel Ángel Campo-Bescós, Leyre Azpilicueta, Otman Aghzout, Ana Vazquez Alejos, Francisco Falcone. Analysis of low power wide area network wireless technologies in smart agriculture for large-scale farm monitoring and tractor communications // Measurement. 2022. Vol. 187. 110231. ISSN 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110231.

28. Teplyakova A. V., Azimov A. M., Alieva L., Zhukov I. A. Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions // Mining Informational and Analytical Bulletin. 2022. № 9. Pp. 120–132. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_120.

29. Mohammad Eltrissi, Omar Yousef, Ahmed El-Banbi, Fouad Khalaf. Drilling operation optimization using machine learning framework // Geoenery Science and Engineering. 2023. Vol. 228. 211969. ISSN 2949-8910. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.211969.

30. Qishuai Yin, Jin Yang, Xinxin Hou, Mayank Tyagi, Xu Zhou, Bohan Cao, Ting Sun, Lilin Li, Dongsheng Xu. Drilling performance improvement in offshore batch wells based on rig state classification using machine learning // Journal of Petroleum Science and Engineering. 2020. Vol. 192. 107306. ISSN 0920-4105. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107306.

31. Zhipeng Feng, Hamdan Gani, Annisa Dwi Damayanti, Helmy Gani, An explainable ensemble machine learning model to elucidate the influential drilling parameters based on rate of penetration prediction // Geoenery Science and Engineering. Vol. 231. Part A. 212231. ISSN 2949-8910. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212231.

32. Farouk Said Boukredera, Mohamed Riad Youcefi, Ahmed Hadjadj, Chinedu Pascal Ezenkwu, Vahid Vaziri, Sumeet S. Aphale, Enhancing the drilling efficiency through the application of machine learning and optimization algorithm // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2023. Vol. 126. Part C. 107035. ISSN 0952-1976. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107035.

33. Nikishin V. V., Blinov P. A., Terekhin V. A. Effectiveness of the method for selecting rotary-steerable systems based on the machine learning algorithm Random Forest Classifier // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2024. № 335(4). Pp. 185–199. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4129.

34. Kusimova E., Saychenko L., Islamova N., Drofa P., Safiullina E., Dengaev A. APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING WELL DISTURBANCES // Journal of Applied Engineering Science. 2023. № 21(1). Pp. 76–86. DOI: 10.5937/jaes0-38729.

© 2025 Автор. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:

Растворова Ирина Ивановна, заведующий кафедрой Электронных систем, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), доктор техн. наук, доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-00012-2196-7463>, e-mail: rastvorova@mail.ru

Труфанов Сергей Александрович, аспирант кафедры Электронных систем, Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (199106, Россия, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, д.2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4886-2079>, e-mail: sergeitrufanov73@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Растворова Ирина Ивановна – поиск и анализ современной литературы, соответствующей тематике исследования.

Труфанов Сергей Александрович – анализ систем управления буровыми установками для выбора эффективных телекоммуникационных технологий, проведение экспериментов в лабораторных условиях, разработка алгоритмов обработки данных.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-12-21

Irina I. Rastvorova*, Sergey A. Trufanov

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University

* for correspondence: sergeitrufanov73@mail.ru

MODELING OF THE CONTROL AND DIAGNOSTICS SYSTEM OF THE ELECTRICAL COMPLEX OF THE DRILLING RIG



Article info

Received:

04 April 2025

Accepted for publication:

30 June 2025

Accepted:

01 August 2025

Published:

28 August 2025

Keywords: drilling, management, optimization, automation, algorithm.

Abstract.

The requirements for the reliability and safety of the electrical systems of drilling rigs, which are operated in harsh conditions, are constantly growing. That is why the problem of improving the methods of monitoring and diagnosing these systems is urgent, which will reduce the likelihood of emergencies and increase their efficiency. The article is devoted to the development of a model for monitoring and diagnostics of electrical systems of drilling rigs, based on the use of modern wireless telecommunications technologies that do not require additional laying of communication cables between various elements of the drilling rig and the control center. The key components of the system are integrated sensors with telecommunication modules that provide real-time data transmission to the driller's personal computer for subsequent analysis. The paper analyzes existing diagnostic methods, and proposes a control system architecture that allows evaluating system parameters in real time. Laboratory experiments were conducted to verify the adequacy of the model, as well as tests on real equipment to verify the results obtained. For data analysis, it is proposed to use machine learning algorithms to increase the speed of detecting optimal parameters and abnormal behavior of drilling equipment. The main results of the work include: the development of an architecture for monitoring and diagnostics of the drilling complex, as well as the development of an algorithm for processing data from a temperature sensor in real time. The results of the study can be adapted for implementation in various types of drilling operations and operating conditions in order to minimize downtime and optimize the cost of maintaining drilling rigs.

For citation: Rastvorova I.I., Trufanov S.A. Modeling of the control and diagnostics system of the electrical complex of the drilling rig. Mining Equipment and Electromechanics, 2025; 4(180):12-21 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2025-4-12-21, EDN: HZZWVH

REFERENCES

1. Popova M.S., Neskromnykh V.V., Zotov Z.G., Liu B. Modern Fundamentals of Automation of Diamond Drilling Process Control. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2023; 334(6):103–112. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/4080. EDN GBNNRS.

2. Neskromnykh V.V., Popova M.S., Golovchenko A.E., Petenev P.G., Baochang L. Method of drilling process control and experimental studies of resistance forces during bits drilling with PDC cutters.

Journal of Mining Institute. 2020; 245(1):539–546. DOI:10.31897/PMI.2020.5.5

3. Kaldarbek M.A., Shardanova U.B., Kayumov K.G. Modeling and optimization of the drilling well control system / M. A. Kaldarbek. *Bulletin of Science*. 2024; 1(6(75)):1642–1662. EDN TUV DLC.

4. Yang Zhou, Xin Chen, Min Wu, Weihua Cao, A novel optimization method for geological drilling vertical well. *Information Sciences*. 2023; 634:550–563. ISSN 0020-0255. DOI: 10.1016/j.ins.2023.03.082.

5. Tretyakov N., Cherepovitsyn A., Komendantova N. Technology Predictions for Arctic Hydrocarbon Development: Digitalization Potential. In:

Schaumburg, H., Korablev, V., Ungvari, L. (eds) Technological Transformation: A New Role For Human, Machines And Management. TT 2020. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021; 157. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-64430-7_21.

6. Samylovskaya E.A., Makhovikov A.B., Lutonin A.S., Medvedev D.A., Kudryavtseva R.A. Digital Technologies in Arctic Oil and Gas Resources Extraction: Global Trends and Russian Experience Resources. 2022. № 3. DOI: 10.3390/resources11030029.

7. Sterkhov I.A., Kraev, N.A. Denisova O.V. Features of the Development of the Functional Units for Submersible Blocks of Downhole Telemetry Systems. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2021. Pp. 164–167. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396635.

8. Naveen Erasala, David C. Yen. Bluetooth technology: a strategic analysis of its role in global 3G wireless communication era. *Computer Standards & Interfaces*. 2022; 24(3):193–206. ISSN 0920-5489. DOI: 10.1016/S0920-5489(02)00018-1.

9. Ismoilov I. I., Gracheva E.I. Improving the controllability of energy systems and improving the quality of electricity. *Bulletin of Kazan State Power Engineering University*. 2022; 14(1(53)):3–12. EDN FEVHHI.

10. Abdullazyanov E.Yu., Gracheva E.I., Alzakkar A., Nizamiyev M.F., Shumikhina O.A., Valtchev S. Forecasting and analysis of electricity consumption and electricity losses at industrial facilities. *News of higher educational institutions. PROBLEMS OF ENERGY*. 2022;24(6):3-12. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-6-3-12.

11. Vasiliev N.I., Dmitriev A.N., Blinov P.A. Deep well drilling at the Russian Antarctic station Vostok. *Bulletin of the Earth Sciences of the Russian Academy of Sciences*. 2012; 4. NZ2001. DOI: 10.2205/2012NZ000111.

12. Bolshunov A.V., Ignatev S.A., Gorelik G.D., Krikun N.S., Vasilev D.A., Rakitin I.V., Shadrin V.S. Comprehensive studies of the snow-firn layer in the area of the Russian Antarctic Vostok Station. *Journal of Mining Institute*. 2025. EDN KBAZNU.

13. Bolshunov A.V., Vasilev D.A., Ignatiev, S.A., Dmitriev A.N., Vasilev N.I. Mechanical drilling of glaciers with bottom-hole scavenging with compressed air. *Led i Sneg*. 2022; 62(1):35–46. DOI: 10.31857/S2076673422010114.

14. Nian-Han Wu, Ming-Zhong Gao, Liang-Yu Zhu, Jia-Nan Li, Dong Fan, Bin You, Wei Luo, Guo-Dong Zhu, Pressure control method and device innovative design for deep oil in-situ exploration and coring. *Petroleum Science*. 2023; 20(2):1169–1182. ISSN 1995-8226. DOI: 10.1016/j.petsci.2022.10.011.

15. Lee Ian, Hawley Robert, Bernsen Steven, Campbell Seth, Clemens-Sewall David, Gerbi Christopher, Hruby Kate. A novel tilt sensor for studying ice deformation: application to streaming ice on Jarvis Glacier, Alaska. *Journal of Glaciology*. 2019; 66:1–9. DOI: 10.1017/jog.2019.84.

16. Xiaojun Shi, Heping Xie, Cong Li, Jianan Li, Guikang Liu, Zhenxi You, Mingzhong Gao, Perfor-

mance of a deep in situ pressure-preserving coring controller in a high-temperature and ultrahigh-pressure test system. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2025; 17(2):877–896. ISSN 1674-7755. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.012.

17. Lazarev A.S., Perkov N.A. Technologies for building modern wireless local area networks. Generation of the Future: The View of Young Scientists-2022: collection of scientific articles of the 11th International Youth Scientific Conference. Kursk. November 10-11, 2022. Vol. 3. Kursk: South-West State University; 2022. Pp. 223–226. EDN PAYIYB.

18. Yamanov A., Alevsky D., Plekhanov A. Local area network in automated process control systems: from cable communication lines to wireless ZigBee channels. *First Mile*. 2013; 35(2):046–053. EDN PZMVWT.

19. Artyushenko V.M., Korchagin V.A. Analysis of wireless data exchange technologies in automation systems of life support of industrial and office premises. *Electrical and information complexes and systems*. 2010; 6(2):18–24. EDN MDXIBR.

20. Cardeira C., Colombo A., Schoop R. Analysis of wireless technologies for automation networking. Editor(s): D.T. Pham, E.E. Eldukhri, A.J. Soroka, Intelligent Production Machines and Systems. *Elsevier Science Ltd*. 2006. Pp. 499–504. ISBN 9780080451572. DOI: 10.1016/B978-008045157-2/50088-2.

21. Ryabtseva V.E. Interfaces for data transmission in automated systems for monitoring and accounting of electric power // Problems of theory and practice of modern science: Collection of scientific articles. Scientific editor T.A. Kolesnikova. Moscow: Pero Publishing House; 2018. Pp. 119–122. EDN YRLEQP.

22. Korotchenko F., Natashina N. Creation of a data transmission network based on PLC technology. *Control Engineering Russia*. 2019; 6(84):64–68. EDN AKQZAU.

23. Stefano Rinaldi, Paolo Ferrari, Alessandra Flammini, Mattia Rizzi, Emiliano Sisinni, Angelo Vezzoli, Performance analysis of power line communication in industrial power distribution network. *Computer Standards & Interfaces*. 2015; 42:9–16. ISSN 0920-5489. DOI: 10.1016/j.csi.2015.03.003.

24. Liangbin Xu, Changzan Liu, Ling Yang, Yang Zhao, Kangquan Ming, Chenlu Zhang, Bowen Ren, Bo Dang, Long-term downhole monitoring and controlling production from wells based on high-temperature DC power line communication. *Energy Reports*. 2022; 8(Supplement 4):175–186. ISSN 2352-4847. DOI: 10.1016/j.egy.2022.01.142.

25. J. Penã Queralta, T.N. Gia, Z. Zou, H. Tenhunen, T. Westerlund, Comparative Study of LPWAN Technologies on Unlicensed Bands for M2M Communication in the IoT: beyond LoRa and LoRaWAN. *Procedia Computer Science*. 2019; 155:343–350. ISSN 1877-0509. DOI: 10.1016/j.procs.2019.08.049.

26. Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, Seung-Hoon Hwang, A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*. 2017; 3(1):14–21. ISSN 2405-9595. DOI: 10.1016/j.icte.2017.03.004.

27. Hicham Klaina, Imanol Picallo Guembe, Peio Lopez-Iturri, Miguel Ángel Campo-Bescós, Leyre Azpilicueta, Otman Aghzout, Ana Vazquez Alejos, Francisco Falcone. Analysis of low power wide area network wireless technologies in smart agriculture for large-scale farm monitoring and tractor communications. *Measurement*. 2022; 187:110231. ISSN 0263-2241. DOI: 10.1016/j.measurement.2021.110231.

28. Teplyakova, A. V., Azimov, A. M., Alieva, L., & Zhukov, I. A. Improvement of manufacturability and endurance of percussion drill assemblies: Review and analysis of engineering solutions. *Mining Information and Analytical Bulletin*. 2002; 9:120–132. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_9_0_120.

29. Mohammad Eltrissi, Omar Yousef, Ahmed El-Banbi, Fouad Khalaf, Drilling operation optimization using machine learning framework. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023; 228:6211969. ISSN 2949-8910, DOI: 10.1016/j.geoen.2023.211969.

30. Qishuai Yin, Jin Yang, Xinxin Hou, Mayank Tyagi, Xu Zhou, Bohan Cao, Ting Sun, Lilin Li, Dongsheng Xu, Drilling performance improvement in offshore batch wells based on rig state classification using machine learning. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020; 192:107306. ISSN 0920-4105. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107306.

31. Zhipeng Feng, Hamdan Gani, Annisa Dwi Damayanti, Helmy Gani, An explainable ensemble

machine learning model to elucidate the influential drilling parameters based on rate of penetration prediction. *Geoenergy Science and Engineering*. 2023; 231(A):212231. ISSN 2949-8910. DOI: 10.1016/j.geoen.2023.212231.

32. Farouk Said Boukredera, Mohamed Riad Youcefi, Ahmed Hadjadj, Chinedu Pascal Ezenkwu, Vahid Vaziri, Sumeet S. Aphale. Enhancing the drilling efficiency through the application of machine learning and optimization algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023; 126(C):107035. ISSN 0952-1976. DOI: 10.1016/j.engappai.2023.107035.

33. Nikishin, V.V., Blinov, P.A., Terekhin, V.A. Effectiveness of the method for selecting rotary-steerable systems based on the machine learning algorithm Random Forest Classifier. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*. 2024; 335(4), 185-199. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4129.

34. Kusimova E., Saychenko L., Islamova N., Drofa P., Safiullina E., Dengaev A. (2023). APPLICATION OF MACHINE LEARNING METHODS FOR PREDICTING WELL DISTURBANCES. *Journal of Applied Engineering Science*. 2023; 21(1):76–86. DOI: 10.5937/jaes0-38729.

© 2025 The Author. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:

Irina I. Rastvorova, Head of the Department of Electronic Systems, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line, 2), Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-00012-2196-7463>, e-mail: rastvorova@mail.ru

Sergey A. Trufanov, postgraduate student of the Department of Electronic Systems, Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (199106, Russia, St. Petersburg, Vasilyevsky Island, 21 line, 2), ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-4886-2079>, e-mail: sergeitrufanov73@mail.ru

Contribution of the authors:

Irina I. Rastvorova – search and analysis of modern literature relevant to the research topic.

Sergey A. Trufanov – analysis of drilling rig control systems for selecting effective telecommunication technologies, conducting experiments in laboratory conditions, developing data processing algorithms

The claimed contribution of the authors:

Authors have read and approved the final manuscript.

