ГИАБ. Горный информационно-аналитический бюллетень /
MIAB. Mining Informational and Analytical Bulletin, 2026;(5):95-109
ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL PAPER

УДК 621.316.925 DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_95

ВИРТУАЛЬНЫЙ СТЕНД РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

В.В. Дмитриева[1], А.Э. Аринич[1], В.А. Кравченко[1], П.Е. Сизин[2]

[1] Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Москва, Россия
[2] НИТУ МИСИС, Москва, Россия, e-mail: mstranger@list.ru

Аннотация: Рассмотрен разработанный на кафедре Теоретической электротехники и электрификации нефтяной и газовой промышленности РГУ Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина виртуальному стенду для изучения релейной защиты и автоматики систем электроснабжения промышленных предприятий. Модернизация техники неизбежно приводит к модернизации технологий обучения. Выполнение лабораторных работ по техническим дисциплинам способствует закреплению и систематизации теоретических знаний и дает возможность приобретения необходимых практических навыков. Преимущества использования виртуального стенда в процессе обучения: экономическая эффективность и доступность; возможность индивидуального подхода к каждому студенту; безопасность учебного процесса; глубина исследований и гибкость. Стенд позволяет осуществлять защиту как отдельных элементов, так и сложных схем электроснабжения. Методы разработки — это математическое моделирование в программе Matlab и в среде графического моделирования Simulink. При создании имитационной модели терминала используются два универсальных принципа. Первый – модульная архитектура виртуальной модели терминала. Модель терминала состоит из двух функционально связанных подсистем, «Терминал–тело» и «Терминал–экран». Второй принцип – использование библиотеки Simulink Dashboard для исполнения интерфейса. Авторы провели анкетирование студентов, первыми опробовавших работу на виртуальном стенде. Все студенты отметили высокое качество разработанного программного продукта. В среднем, оценка составила 4,75 балла. Научная новизна заключается в реализации модульной архитектуры терминала релейной защиты и автоматики с динамически управляемыми параметрами на основе специализированной библиотеки компонентов, что обеспечивает гибкость исследований и возможность анализа данных работы защит в реальных условиях.

Ключевые слова: виртуальный лабораторный стенд, релейная защита и автоматика, токовая защита, уставки релейной защиты, Matlab/Simulink, модульная архитектура виртуальной модели, «Терминал–тело», «Терминал–экран», динамическое изменение уставок, анкетирование студентов.

Для цитирования: *Дмитриева В. В., Аринич А. Э., Кравченко В. А., Сизин П. Е.* Виртуальный стенд релейной защиты и автоматики систем электроснабжения и электроустановок // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 5. – С. 95–109. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_95.

© В.В. Дмитриева, А.Э. Аринич, В.А. Кравченко, П.Е. Сизин. 2026.

Virtual lab-scale simulator of relay protection and automation for power supply systems and electrical installations

V.V. Dmitrieva[1], A.E. Arinich[1], V.A. Kravchenko[1], P.E. Sizin[2]

[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Moscow, Russia
[2] NUST MISIS, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru

Abstract: The article describes a virtual simulator engineered at the Department of Theoretical Electrical Engineering and Electrification of Oil and Gas Industry at the Gubkin Russian State University of Oil and Gas for studying relay protection and automation of industrial power supply systems. Technology modernization necessitates modernization of education and training. Laboratory test works on engineering promote reinforcement of learning and systematization of theoretical skills, and allows practicing new experience. The advantages of the virtual simulator as a training tool are: economic efficiency and availability; individual attention to each student; safety of training process; depth and flexibility of investigation. The simulator allows exercising protection of individual components and complex circuits of electric power supply. The development methods were mathematical modeling in Matlab and graphical modeling in Simulink. The simulation modeling used two universal concepts. The first is the modular architecture of the virtual terminal. The model of the terminal consists of two functionally interconnected subsystems: Terminal–Body and Terminal–Display. The second concept is the use of the Simulink Dashboard library to implement the interface. The authors conducted a survey of students who were the first to test-operate the virtual simulator. All surveyed students emphasized the high quality of the designed program product. The average rating was 4.75. The scientific novelty consists in the modular architecture of the relay protection and automation simulator, with the dynamically controllable parameters, on the basis of the customized component library, which ensures flexibility of research investigation and allows analyzing data on real-life operation of relay protection systems.

Key words: virtual lab-scale simulator, relay protection and automation, current protection, relay protection settings, Matlab/Simulink, modular architecture of virtual model, Terminal–Body, Terminal–Display, dynamic change of settings, student survey.

For citation: Dmitrieva V. V., Arinich A. E., Kravchenko V. A., Sizin P. E. Virtual lab-scale simulator of relay protection and automation for power supply systems and electrical installations. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026;(5):95-109. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_95.

Введение

Горные и нефтяные предприятия являются мощными и ответственными потребителями электрической энергии, но они обладают особенностями, отличающими их от общепромышленных потребителей, следовательно, и релейная защита и автоматика электроустановок сырьевой промышленности имеет ряд специфических черт [1]. Во-первых, следует отметить тяжелые горно-геологические условия, особенно в подземных выработках: ограниченность рабочего пространства, запыление и загазованность, приводящие к пожаро- и взрывоопасности рудников и шахт. Для предохранения от этих факторов шахтное оборудование и коммутационная аппаратура встраиваются в специальные взрывозащищенные оболочки, там же разме-

щаются и устройства релейной защиты и автоматики (РЗиА). К самим устройствам РЗ предъявляют особые требования по надежности, размерам, чувствительности, быстродействию, бесперебойности работы, простоте обслуживания [2, 3]. Во-вторых, отмечается соизмеримость максимальных токов коммутационных переключений электроустановок с минимальными токами коротких замыканий (КЗ).

Из-за определенных свойств источников и потребителей, а также из-за колебания напряжения токи двухфазных КЗ меняются до ±20 — 25%. В-третьих, для приводов подземного горно-шахтного оборудования, особенно для лавных и скребковых конвейеров, часто используются асинхронные трехфазные двигатели. При запуске асинхронных двигателей пусковой ток превышает номинальный в 5 — 10 раз, например, при пуске груженого конвейера. Для снижения пусковых токов современные электроприводы выполняются по схеме «частотный преобразователь–асинхронный двигатель» (ПЧ–АД). Но наличие ПЧ приводит к возникновению другой проблемы, а именно, несинусоидальности питающего напряжения. В-четвертых, сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В должны быть оснащены максимальной токовой защитой и защитой от утечек тока на землю (реле утечки). Некоторые исследования, которые анализируют повреждения в системах электроснабжения горных предприятий, например, за период 1995 — 2015 гг., показали, что основные причины аварийных отключений связаны с возникновением однофазных замыканий на землю (ОЗЗ). ОЗЗ происходят в 3,88 раза чаще, чем междуфазные замыкания, однако в большинстве случаев они переходят в многофазные КЗ, отключаемые максимальной токовой защитой (МТЗ). Для предотвращения поражения персонала, повреждения оборудования используется защитное отключение — быстродействующая защита, обеспечивающая автоматическое отключение электроустановки при возникновении в ней опасности электропоражений. В электроустановках шахт защитное отключение осуществляется с помощью реле утечки.

При проектировании систем релейной защиты на предприятиях нефтегазовой промышленности также необходимо учитывать отраслевые особенности. Одной из таких особенностей является большая протяженность кабельных линий. Обуславливается это большими площадями нефтегазовых предприятий, но экономически невыгодно устанавливать на каждой подстанции свой источник питания.

Возрастающее электропотребление в нефтяной и горной промышленности, увеличение мощности трансформаторов, интенсивная динамика электросетей делает учебный курс релейной защиты и автоматики в сырьевой промышленности чрезвычайно актуальным. Задачи курса включают в себя усвоение основных принципов разработки и обслуживания защиты как отдельных элементов системы электроснабжения (СЭС), так и всей СЭС в целом; изучение основных методик расчета систем РЗиА; приобретение навыков наладки и эксплуатации устройств релейной защиты и автоматики.

Модернизация техники неизбежно приводит к модернизации технологий обучения. Современная система обучения студентов предполагает, что выполнение лабораторных работ по техническим дисциплинам способствует закреплению и систематизации теоретических знаний, получаемых на лекциях и семинарах, а также дает возможность приобретения необходимых практических навыков.

Во многих вузах, в том числе и в РГУ Нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губки-

на, достаточно остро стоит вопрос приобретения лабораторного оборудования для проведения работ: испытательных и тестовых стендов, установок, модулей, макетов и т.д. [4—7], поэтому авторами был разработан виртуальный лабораторный стенд для дисциплины «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения». Виртуальные стенды позволяют как решать учебные задачи, так и воспроизводить производственные процессы, при этом уменьшаются затраты средств и времени. Задача создания лабораторного стенда является весьма актуальной для многих вузов, так как это дает возможность оснастить все образовательные учреждения новым учебным оборудованием, существенно уменьшив экономические затраты.

Разработка виртуальных стендов широко практикуется в ведущих университетах и научных организациях [8—10]. Используются при этом различные моделирующие программы: Matlab, Etap, Power System Simulator for Engineering, LabVIEW. Для создания нашего лабораторного стенда мы использовали систему моделирования в пакете прикладных программ для технических вычислений Matlab и его среде графического моделирования Simulink. Областями применения Matlab/Simulink являются моделирование сложных систем, разработка алгоритмов для систем управления, моделирование с помощью виртуальных объектов, мультидоменное моделирование. Matlab имеет возможность поддержки аппаратных платформ для связи с микроконтроллерами и программируемыми логическими интегральными схемами (ПЛИС), обладает высокой скоростью обработки данных и удобным пользовательским интерфейсом. По перечисленным выше причинам авторы воспользовались средой программированием Matlab.

Дисциплина РЗиА входит в учебные планы многих специальностей высшего и среднего специального образования, связанных с электроэнергетикой: Электроэнергетика и электротехника, Энергетическое машиностроение, Электрификация и автоматизация горного производства, Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем, и др.

Система релейной защиты служит гарантией безопасной и стабильной работы электрооборудования [11, 12], а важнейшим аспектом РЗ выступает корректное определение уставок реле [8—10]. Разработанный стенд дает возможность учащимся овладеть необходимыми компетенциями.

Методы, используемые при разработке виртуального стенда РЗиА

При создании имитационной модели терминала используются два универсальных принципа, справедливых для всех виртуальных устройств [6, 7, 13].

Первый принцип — это модульная архитектура виртуальной модели терминала. Модель терминала состоит из двух функционально связанных подсистем, «Терминал–тело» и «Терминал–экран».

Рассмотрим подсистему «Терминал–тело». Она представляет собой набор библиотечных алгоритмов релейной защиты, определенных для конкретного типа защищаемого объекта (например, двигателя, линии, трансформатора).

«Терминал–тело», согласно рис. 1, можно разделить на несколько частей.

Блок 1. Измерительная часть. Модуль представляет собой порты ввода для аналоговых сигналов (токов, напряжений) от измерительных трансформаторов. Его функции включают первичную обработку сигнала для преобразования исходных данных в вид, пригодный для последующих вычислений в алгоритмах защиты.

Бок 2. Логическая часть представляет собой совокупность программно реа-

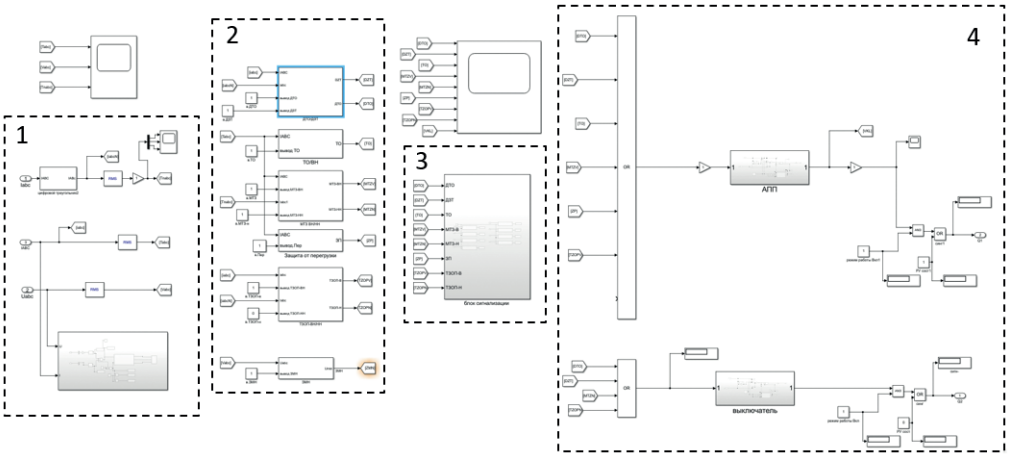

Рис. 1. Структурная схема «терминала–тело»
Fig. 1. Block diagram of the «terminal–body»

лизованных алгоритмов релейной защиты (МТЗ, токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП), ТО (токовая отсечка), дифференциальная защита). На этом этапе обработанные измерительные данные сравниваются с уставками, оценивается их возможное превышение, формируются временные выдержки.

Блок 3. Модуль сигнализации фиксирует факт срабатывания любого из алгоритмов защиты, формируя сигнал для оперативного персонала.

Блок 4. Выходная часть. Модуль представляет собой порты вывода, которые формируют и передают команды на внешние устройства, например, на отключение выключателя через выходное реле, или на передачу информации в автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУ ТП) через промышленную сеть.

Подсистема «Терминал–экран» — это программно-аппаратный комплекс, предоставляющий оператору средства для взаимодействия с тестируемой схемой, ввода тестовых данных и визуализации выходных сигналов. «Терминал–экран» структурно разде-

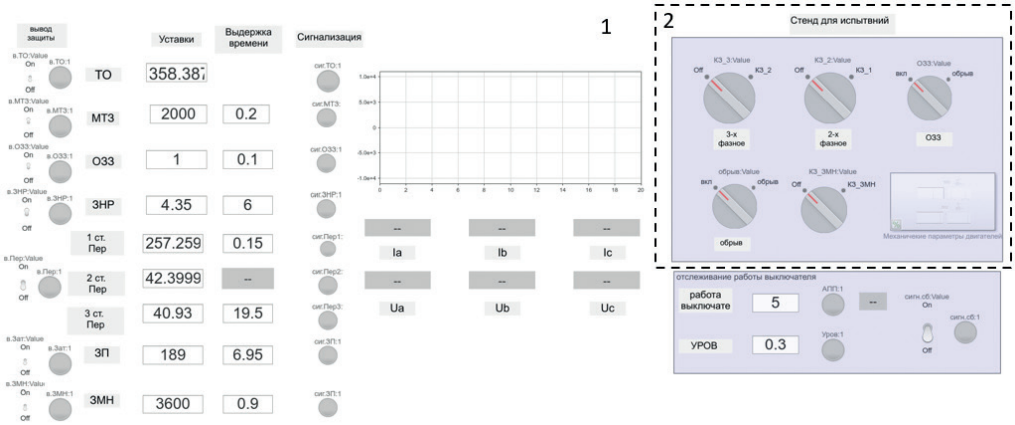

Рис. 2. Подсистема «Терминал–экран»
Fig. 2. The «Terminal–screen» subsystem

лен на две функциональные области. Область 1 на рис. 2: интерфейс управления защитами, предназначенный для конфигурации РЗ и управления отдельными устройствами. Кроме уже перечисленных защит, на рис. 2 представлены: защита минимального напряжения (ЗМН), защита от неполнофазного режима (ЗНР), три ступени защиты от перегрузки (ЗП).

Функционал области включает в себя:

- задание уставок — установка и корректировка параметров срабатывания защит (пороговых значений, выдержек времени);
- сигнализацию (отображение и индикация срабатывания защит, аварийных и предупредительных сигналов);
- управление состоянием (ручной вывод защит из действия для проведения обслуживания или тестирования).

Область 2 на рис. 2: интерфейс испытательного стенда. Его назначение — проведение комплексных испытаний и моделирование режимов работы энергосистемы. Его функционал включает в себя:

- автоматизированное тестирование, то есть запуск предустановленных испытательных программ (тест-планов) для проверки логики и характеристик защит;
- ручное моделирование: создание и воспроизведение произвольных сценариев для оценки реакции защит, таких как короткие замыкания, колебания мощности, режим качаний.

«Терминал–экран» представляет собой настраиваемую панель управления. Конечный пользователь может адаптировать его состав и компоновку под требования конкретного тестового сценария или объекта управления.

Второй принцип реализации виртуальной модели стенда — это использование библиотеки Simulink Dashboard для исполнения интерфейса. Данная библиотека предоставляет набор готовых элементов управления (кнопки, переключатели) и индикаторов (лампы, приборные панели, графики).

Для обеспечения связи между элементами интерфейса и моделью каждый элемент управления или индикатор должен быть однозначно сопоставлен с соответствующим сигналом внутри модели Simulink. Это сопоставление осуществляется через механизм привязки по уникальному тегу. Для обеспечения возможности взаимодействия пользователя с моделью через «терминал–экран», разработчик должен в обязательном порядке выполнить привязку каждого визуального объекта к целевому сигналу, используя его уникальный идентификатор, как показано на рис. 3.

Для реализации систем РЗиА различных элементов электроэнергетических систем необходимо предусмотреть создание специализированной библиотеки компонентов [2, 14, 15]. Разработанная библиотека структурирована и включает в себя следующие модули: базовые элементы, алгоритмы защитных функций, а также вспомогательное программное обеспечение. Рассмотрим кратко каждый из этих модулей. Модуль

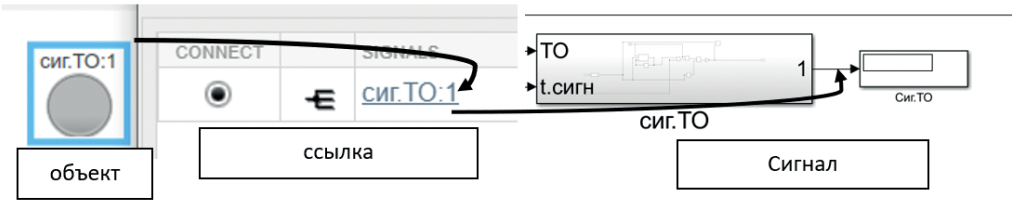

Рис. 3. Принцип привязывания объекта к сигналу
Fig. 3. The principle of binding an object to a signal

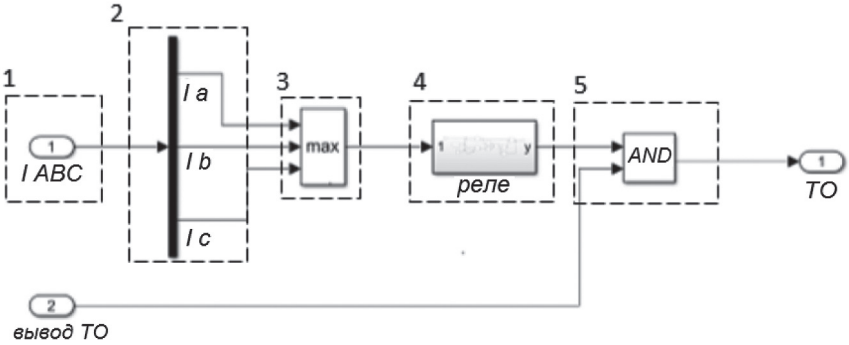

Рис. 4. Структурная схема модуля ТО
Fig. 4. Block diagram of the current cut-off module

базовых элементов представляет собой библиотеку функциональных блоков, предназначенных для синтеза основных алгоритмов релейной защиты. К числу таких элементов относятся: реле различных типов, блоки выдержки времени на срабатывание и на возврат, логические элементы, триггеры, фильтры симметричных составляющих, тормозные характеристики. Важно отметить, что в среде моделирования Simulink присутствуют встроенные элементы аналогичного назначения. Однако они являются статическими моделями, функциональность которых не предусматривает интерактивного взаимодействия с пользователем в процессе моделирования. Разработка данного модуля направлена на устранение этого ограничения. Его создание позволит обеспечить динамическое управление параметрами элементов в реальном времени, необходимое для проведения полноценных и гибких исследований работы алгоритмов защиты. Это выгодно отличает стенд от аналогичных разработок и делает его более совершенным.

На базе основных элементов разработаны алгоритмы основных защит — ТО, МТЗ, защита от перегрузки с зависимой выдержкой времени, дифференциальная защита, дифференциальная защита с торможением, дифференциальная ТО, защита от замыкания на землю. Этот модуль библиотеки представляет собой комплекс готовых решений, которые соответствуют типовым функциям релейной защиты. Рассмотрим в качестве примера реализацию алгоритма ТО.

Пример выполнения токовой защиты на виртуальном стенде

ТО — защита, используемая практически на всех видах электрического оборудования. При моделировании ТО будем пользоваться элементами из собственной библиотеки, реле, выдержкой времени на срабатывание и логическими элементами из библиотеки Simulink.

На рис. 4 приведена структурная схема модуля токовой отсечки ТО.

Модель состоит из 5 частей: измерительный вход (Input Measurement Block); блок разделения сигналов (Signal Demultiplexer, Demux), блок определения максимума (Maximum Value Block, MAX); блок «Реле», в котором рассчитанный максимальный ток сравнивается с заданной уставкой срабатывания защиты; логический элемент «И» (AND), который выполняет функцию блокировки срабатывания защиты. Сигнал с реле поступает на один из его входов. На второй вход подается сигнал разрешения «Вывод ТО». Цепь срабатывания будет

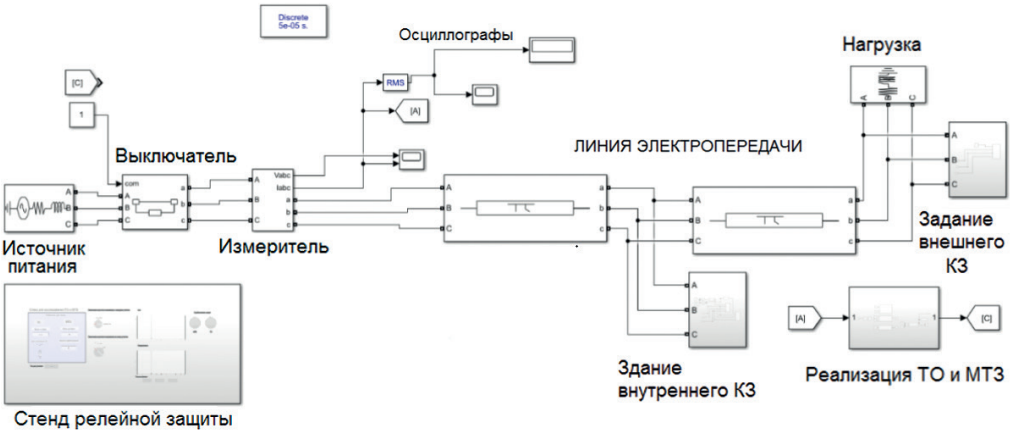

Рис. 5. Схема для исследования токовой отсечки и максимальной токовой защиты высоковольтной линии электропередачи

Fig. 5. Diagram for investigating Current cut-off and maximum current protection of a high-voltage power transmission line

активирована только при наличии сигнала от реле и сигнала разрешения, что позволяет заблокировать работу защиты.

Теперь рассмотрим работу с этим алгоритмом, реализовав ТО линии электропередачи. Для проведения экспериментов в Matlab/Simulink следует сначала собрать схему, приведенную на рис. 5. Защищаемым объектом является высоковольтная линия электропередачи (ВЛ). Основные элементы соединены здесь согласно логике работы РЗиА. Вторым шагом исследований нужно задать параметры всех элементов.

С помощью «Измерителя» происходит съем действующих значений токов и напряжений, и по каналам связи «а» эти данные подаются в блок, реализующий ТО и МТЗ, как показано на рис. 4. Выходной сигнал блока «Реализации ТО и МТЗ» передается по каналу С на выключатель, отключающий линию от источника в случае внутреннего КЗ. КЗ задаются специальными блоками.

Проведение исследований

Разработанный стенд дает возможность автоматического вычисления уставок РЗ. Для расчета уставок ТО следует включить трехфазное КЗ в конце защищаемой линии, полученный ток максимального внешнего КЗ $I^{(3)}_{\text{вн max}}$ используется для расчета уставки.

Авторами разработана методика проведения экспериментов, которая позволяет не только изучать дисциплину РЗиА, но и рассчитывать уставки защиты для реальных объектов, имитировать КЗ и настраивать защиту для их ликвидации. Отрывок такой методики приведем на рис. 6. Для этого нужно открыть подсистему «Стенд–экран» и выполнить следующие действия: убедитесь, что тумблер (переключатель), отвечающий за блок ТО, находится в положении «OFF» (цифра *1* на рис. 6). Это позволяет работать только органу МТЗ. Включив один из тумблеров, можно имитировать КЗ на одном из участков ЛЭП (в середине или в конце участка (цифра *2* на рис. 6)). Для расчета МТЗ следует получить величину максимального рабочего тока линии, задав увеличенную на 50% мощность нагрузки в соответствующем блоке. По этой величине задать уставку МТЗ (цифра *3* на рис. 6). После того, как все стадии эксперимента выполнены, следует запустить моделирование (циф-

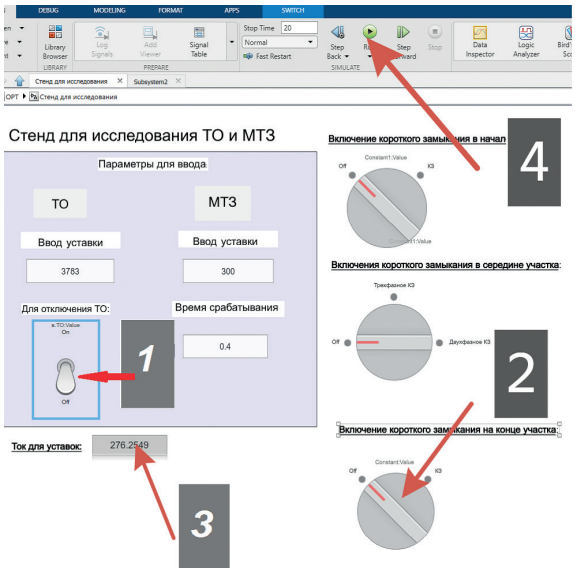

Рис. 6. Пример работы со стендом
Fig. 6. An example of working with a stand

ра *4* на рис. 6). Результаты работы можно увидеть на рис. 7. На графике тока в момент КЗ видно резкий скачок тока до величины, значительно превышающей ток нагрузки. Этот повышенный ток будет протекать в цепи в течение некоторого времени (обычно несколько десятых долей секунды). Поскольку МТЗ чаще всего реализует третью ступень РЗ, то для проверки ее действия нужно задать выдержку времени Δt, что тоже предусмотрено на стенде. Через заданное время линия будет отключена защитой МТЗ, ток упадет до нуля. Для сигнализации используется лампочка на панели стенда.

Преимущества использования виртуального стенда в процессе обучения

Во-первых, следует отметить экономическую эффективность и доступность.

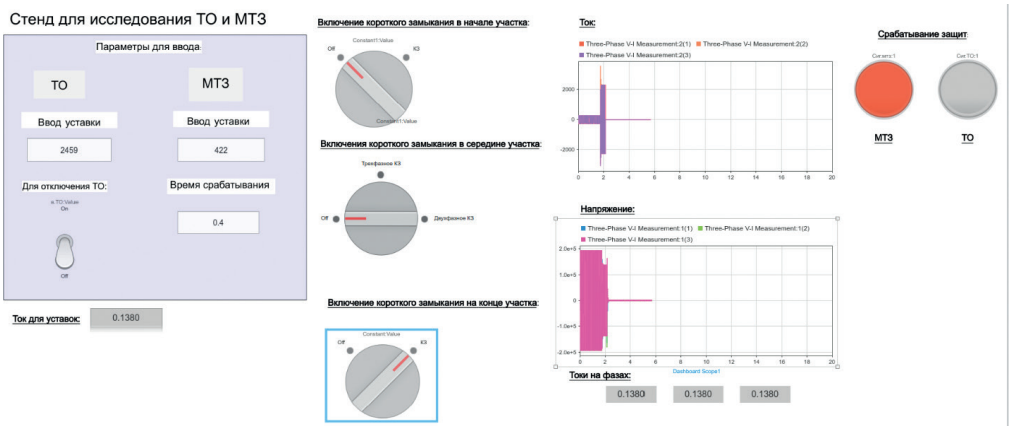

Рис. 7 Вид «Стенда–экрана» для исследования МТЗ
Fig. 7. View of the «Stand–screen» for maximum current protection research

Приобретение физического стенда сопряжено со значительными капитальными затратами на закупку специализированного оборудования (трансформаторы тока, реле РТ-40, РТ-80, измерительные приборы, панели управления), его регулярное техническое обслуживание и ремонт. Высокая стоимость и ограниченное количество установок приводят к невозможности их детального использования большими группами студентов. Имитационный стенд, реализованный в программной среде, требует лишь наличия стандартных персональных компьютеров или ноутбуков.

Во-вторых, появляется возможность индивидуального подхода к каждому студенту. Работа на физическом стенде обычно носит групповой характер. Студенты вынуждены объединяться в группы по 3 — 5 человек, чтобы собраться вокруг одной установки. Это приводит к тому, что активную работу выполняет лишь часть студентов, в то время как остальные находятся в роли пассивных наблюдателей. Имитационный стенд обеспечивает полную индивидуализацию обучения. Каждый студент работает за своим компьютером, самостоятельно собирает виртуальные схемы, проводит измерения и анализирует результаты. Это позволяет гарантировать, что каждый обучающийся в полной мере освоит практические навыки.

В-третьих, большое внимание следует уделить безопасности учебного процесса. Физический стенд предполагает работу с оперативными цепями постоянного тока (как правило, 110 — 220 В), которые являются потенциально опасными для жизни. Неправильные действия студента при коммутации могут привести к короткому замыканию, выходу оборудования из строя и, что самое главное, к поражению электрическим током. Это требует постоянного строгого контроля со стороны преподавателя, и не позволяет студентам экспериментировать самостоятельно. Работа на имитационном стенде является абсолютно безопасной. Студент может допускать ошибки при сборке схемы (например, создать виртуальное КЗ) без какого-либо риска для себя и оборудования.

И, наконец, следует отметить глубину исследований и гибкость. Физический стенд обладает ограниченной гибкостью. Конфигурация схемы, типы реле и точки для моделирования КЗ жестко заданы его конструкцией. Студенты изучают работу конкретных типов реле по строго регламентированному сценарию. Имитационный стенд предоставляет неограниченные возможности для анализа. Студент может легко изменять параметры всех элементов сети (длину ЛЭП, мощность нагрузки, сопротивление источника), моделировать короткие замыкания в любой точке линии с высокой точностью, получать детальные осциллограммы токов и напряжений в любой точке схемы, что позволяет анализировать переходные процессы и точно фиксировать моменты срабатывания защит.

Анкетирование студентов, работавших на стенде

Авторы провели анкетирование студентов, первыми опробовавших работу на виртуальном стенде. Диаграмму с ответами можно видеть на рис. 8.

Все студенты отметили высокое качество разработанного программного продукта. В среднем, оценка составила 4,75 балла по пятибалльной шкале. Было предложено написать методические указания для выполнения работ, чтобы облегчить работу и студентов, и преподавателей. Были предложения сравнивать работу на физическом стенде и виртуальном. Студенты отметили, что стенд хорошо помогает освоить

Рис. 8. Результаты анкетирования студентов
Fig. 8. An example of a student survey

расчет уставок РЗ, улучшить понимание принципов работы РЗ. В качестве дополнений к модели стенда было предложено отображать не только схемы моделирования, но и структурные схемы СЭС для более точного представления о ней. Замечание и недовольство студентов по большому счету вызвало только одно — привязка модели стенда к конкретной версии Matlab, и это действительно серьезная проблема, созданная искусственно разработчиками, поскольку она связана с несовместимостью версий одной и той же программы.

Оценка конкурентоспособности и применимости стенда для научных исследований

Авторы провели анализ существующих отечественных разработок виртуальных стендов для РЗиА. Обнаружено следующее. С одной стороны, разрабатываются виртуальные аналоги существующих физических стендов («Стенд-тренажер виртуальный Основы РЗиА»). Это точное воспроизведение лабораторного стенда, со всеми недостатками, которые перечислены выше. Выполнять на нем можно только те лабораторные работы, которые заложены разработчиками. Ни о каких научных исследованиях реальных физических систем электроснабжения речи идти не может. С другой стороны, разрабатываются компьютерные модели отдельных элементов — индукционных реле, микропроцессорных реле, работы релейной защиты при самозапуске двигателей, при асинхронном ходе. Разработанный стенд является, во-первых, комплексной системой, имеющей полный набор всевозможных типов реле и алгоритмов наиболее распространенных защит. Во-вторых, он имеет дополнительные возможности, например, построения векторных диаграмм, построения характеристик реле направления мощности, реле сопротивления, тормозных характеристик. В-третьих, имеется возможность управления стенда уставками. В современных СЭС уставки РЗ зависят от режимов работы, от нагрузки на систему, от непостоянного режима работы, учета маловероятных режимов. Стенд дает возможность тестирования этих режимов и динамического изменения уставок.

Прямое использование среды Matlab/Simulink для моделирования электроэнергетических систем имеет ограничение, обусловленное зависимостью результатов от точности моделирования

элементов СЭС, параметры которых могут отличаться от характеристик реальных объектов. Кроме того, вычислительная сложность моделирования может стать существенной проблемой, создавая большую вычислительную нагрузку. Для преодоления этого препятствия в архитектуру виртуального стенда заложена открытость к внешним данным. Был разработан специальный скрипт, позволяющий импортировать в среду Matlab/Simulink результаты расчетов переходных процессов, выполненных в специальных программных комплексах. Это дает возможность проводить анализ работы алгоритмов РЗ на основе данных, полученных от детальных моделей крупных энергосистем, выполненных в таких программах, как ETAP, SAD. Для повышения достоверности исследования и перехода от модельных испытаний к анализу реальных процессов был создан отдельный программный модуль, функции которого — импорт и обработка аварийных осциллограмм, зарегистрированных реальными терминалами РЗиА в стандартном промышленном формате COMTRADE. Это позволяет тестировать и отлаживать алгоритмы защит на основе записей реальных аварийных режимов и дает возможность перейти от учебных работ на новый уровень исследовательской работы.

Развитие современных высокотехнологичных средств, схем и алгоритмов релейной защиты, повышение эффективности обнаружения неисправностей обеспечивают стабильность и безопасность работы системы электроснабжения. При проектировании РЗ на современном этапе все активнее используют нечеткую логику [16], искусственный интеллект [17], интеллектуальные реле [18—20]. Желательно, чтобы все новые разработки проходили предварительное тестирование, апробацию и испытания. Разработанный стенд обладает возможностью развития и расширения своей инструментальной базы, что делает привлекательным его использование для подобного тестирования.

Проведение таких исследований позволяет повысить надежность работы РЗ, более успешно устранять сбои в работе СЭС. Интеллектуальные устройства могут играть большую роль в автоматизации РЗ, возможности применения автоматизированного проектирования [15, 21, 22], усилении стабильности работы. Все это должно обеспечить более высокую скорость, точность и гибкость РЗ и тем самым гарантировать устойчивую и безопасную работу СЭС.

Выводы

Авторами разработана и опробована в учебном процессе модель виртуального стенда по дисциплине релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Также авторами разработана методика проведения экспериментов, лабораторных работ, курсовых проектов, выпускных квалификационных работ и других практических исследований.

Авторы получили обратную связь от студентов, которые высоко оценили предложенную им работу на виртуальном стенде. Работа была представлена на международном симпозиуме «Неделя Горняка–2026», где получила высокую оценку.

Авторы благодарят группу АЭ-22-03 за активное участие в освоении стенда и в анкетировании по результатам проделанной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Плащанский Л. А.* Электроснабжение горного производства. Релейная защита. — М.: Изд-во «Горная книга», 2013. — 269 с.

2. *Cong Cuong Nguyen, Huyen Trang Nguyen, Xuan Thanh Le, Viet Bun Ho* A research of utilizing directional protective device for improving the sensitivity of digital relay in Vietnam coal mines grid // Journal of the Polish Mineral Engineering Society. 2025, vol. 1, no. 2, pp. 441 — 453. DOI: 10.29227/IM-2025-01-02-035.

3. *Клюев Р. В., Босиков И. И., Гаврилина О. А.* Повышение эффективности релейной защиты на горно-обогатительном комбинате // Записки Горного института. — 2021. — Т. 248. — С. 300 — 311. DOI: 10.31897/PIM: 2021.2.14.

4. *Карманова О. А., Белоглазов А. А.* Создание виртуального стенда для исследования группового систематического кода в среде моделирования Matlab // Прикладная информатика. — 2008. — № 6. — С. 6 — 10.

5. *Iliev I., Kryukov A., Suslov K., Kodolov N., Kryukov A., Beloev I., Valeeva Y.* Modeling of measuring transducers for relay protection systems of electrical installations // Sensors. 2025, vol. 25, no. 2, article 344. DOI: 10.3390/s25020344.

6. *Новаш И. В.* Моделирование энергосистем и испытание устройств релейной защиты в режиме реального и модельного времени // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. — 2017. — Т. 60. — № 3. — С. 198 — 210. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210.

7. *Ершов Ю. А., Малеев А. В.* Моделирование микропроцессорных релейных защит в среде MATLAB // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: техника и технологии. — 2010. — Т. 3. — № 2. — С. 221 — 228.

8. *Esmaio Mustafa Ali, Eltaeb Mohamed Ali* Distance protection relay and effect MOV on zones of relay using MATLAB // International Science and Technology Journal. 2024, vol. 34, no. 1, pp. 1 — 14. DOI: 10.62341/mdmp2724.

9. A*meer Aqeel Kamoona, Husam H. Mohammed, Heba Z. Abdoul Kreem* Optimizing automated reley settings: a comparative analysis using simulation — based protection schemes // International Journal of Engineering Science Technologies. 2025, vol. 9, no. 2. DOI: 10.29121/ijoest.v9.i2.2025.693.

10. *Azizan N. S., Chin Leong Wooi, Baharuddin Ismail, Syahrun Nizam Md Arshad Hashim* Simulation of differential relay for transformer protection // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020, vol. 767, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/767/1/012004.

11. *Fei Li, Luochen Zhuyuan* A summary of relay protection-based simulation for dynamic performance and reliability assessment // International Journal for Applied Information Management. 2023, vol. 3, no. 1, pp. 11 — 23. DOI: 10.47738/ijaim.v3i1.46.

12. *Karimi M., Mokhlis H., Bakar A. H. A., Shahriari A., Faradonbeh M. A., Rosli H. M.* Impact of Load Modeling in Distribution State Estimation / 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia, 2012. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230837.

13. *Лебедев В. Д., Кутумов Ю. Д.* Математическое моделирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения для разработки устройств релейной защиты на волновом принципе // Вестник ИГЭУ. — 2020. — № 2. — С. 42 — 50.

14. *Иванов И. Ю., Новокрещенов В. В., Иванова В. Р.* Моделирование участка электрической сети с устройством продольной компенсации для исследования параметров, влияющих на чувствительность дифференциальной защиты // Вестник ИГЭУ. — 2025. — № 4. — С. 57 — 65. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.057-065.

15. *Dinesh Rangana Gurusinghe, Jagannath Wijekoon* Showcasing applications of a multi-zone distance protection relay model using a digital real-time simulator / PAC World Conference. 2025.

16. *Uakhitova A., Yerbolkyzy G., Tatkeyeva G.* Development of a fuzzy logic-based model for assessing the reliability of relay protection systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024, vol. 4, no. 2(130), pp. 67 — 77. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310549.

17. *Weiwen Xiao, Xinfand Ren* Artificial intelligence algorithms enhancing relay protection and operational efficiency in high and low voltage distribution networks // Intelligent Decision Technologies. 2025, vol. 19, no. 5. DOI: 10.1177/18724981251355872.

18. *Ubong Sebastian Ekop, Ekom E. Okpo, Anyanime Tim Umoette* Application of intelligent overcurrent relays for real-time protection of induction motor under fault conditions // Journal of Engineering Research and Reports. 2025, vol. 27, no. 3, pp. 489 — 510. DOI: 10.9734/jerr/2025/v27i31447.

19. *Penghuan Yan* Development status and prospects of relay protection technology in smart grids // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2025, vol. 155, pp. 41 — 48. DOI: 10. 54097/ghpfxv49.

20. *Tao Wen, Wei Liu, Shaolin Jiao, Jia Zhu* Quantitative evaluation method of operation reliability of substation relay protection device based on improved neural network algorithm // Journal of Physics Conference Series. 2024, vol. 2704, no. 1, article 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2704/1/012002.

21. *Shihang Gao, Yulong Ma, Fengrong Zhao, Zhiyang Zou Singl*e Event effect protection design of output module of relay protection device // Journal of Physics Conference Series. 2024, vol. 2785, no. 1, article 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2785/1/012027.

22. *Белозеров П. А., Шевченко Т. Ю.* Автоматизация проектирования релейной защиты трансформаторов // Молодой исследователь Дона. — 2020. — № 6. — С. 39—43. ГИАБ

REFERENCES

1. Plashchanskiy L. A. *Elektrosnabzhenie gornogo proizvodstva. Releynaya zashchita* [Power supply of mining production. Relay protection], Moscow, Izd-vo «Gornaya kniga», 2013, 269 p.

2. Cong Cuong Nguyen, Huyen Trang Nguyen, Xuan Thanh Le, Viet Bun Ho A research of utilizing directional protective device for improving the sensitivity of digital relay in Vietnam coal mines grid. *Journal of the Polish Mineral Engineering Society.* 2025, vol. 1, no. 2, pp. 441—453. DOI: 10.29227/IM-2025-01-02-035.

3. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Gavrilina O. A. Improving the efficiency of relay protection at a mining and processing plant. *Journal of Mining Institute*. 2021, vol. 248, pp. 300—311. [In Russ]. DOI: 10.31897/PIM: 2021.2.14.

4. Karmanova O. A., Beloglazov A. A. Creation of a virtual booth for the study of group systematic code in the Matlab modeling environment. *Journal of Applied Informatics*. 2008, no. 6, pp. 6—10. [In Russ].

5. Iliev I., Kryukov A., Suslov K., Kodolov N., Kryukov A., Beloev I., Valeeva Y. Modeling of measuring transducers for relay protection systems of electrical installations. *Sensors*. 2025, vol. 25, no. 2, article 344. DOI: 10.3390/s25020344.

6. Novash I. V. Modeling of power systems and testing of relay protection devices in real and model time. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2017, vol. 60, no. 3, pp. 198—210. [In Russ]. DOI: 10.21122/1029-7448-2017-60-3-198-210.

7. Ershov Yu. A., Maleev A.V. Modeling of microprocessor relay protections in the MATLAB environment. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2010, vol. 3, no. 2, pp. 221—228. [In Russ].

8. Esmaio Mustafa Ali, Eltaeb Mohamed Ali Distance protection relay and effect MOV on zones of relay using MATLAB. *International Science and Technology Journal*. 2024, vol. 34, no. 1, pp. 1—14. DOI: 10.62341/mdmp2724.

9. Ameer Aqeel Kamoona, Husam H. Mohammed, Heba Z. Abdoul Kreem Optimizing automated reley settings: a comparative analysis using simulation — based protection schemes. *International Journal of Engineering Science Technologies*. 2025, vol. 9, no. 2. DOI: 10.29121/ijoest.v9.i2.2025.693.

10. Azizan N. S., Chin Leong Wooi, Baharuddin Ismail, Syahrun Nizam Md Arshad Hashim Simulation of differential relay for transformer protection. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*. 2020, vol. 767, no. 1, article 012004. DOI: 10.1088/1757-899X/767/1/012004.

11. Fei Li, Luochen Zhuyuan A summary of relay protection-based simulation for dynamic performance and reliability assessment. *International Journal for Applied Information Management*. 2023, vol. 3, no. 1, pp. 11—23. DOI: 10.47738/ijaim.v3i1.46.

12. Karimi M., Mokhlis H., Bakar A. H. A., Shahriari A., Faradonbeh M. A., Rosli H. M. Impact of Load Modeling in Distribution State Estimation. *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka*, Malaysia, 2012. DOI: 10.1109/PEOCO.2012.6230837.

13. Lebedev V. D., Kutumov Yu.D. Mathematical modeling of ultrahigh voltage power transmission lines for the development of relay protection devices based on the wave principle. *Bulletin ISPEU*. 2020, no. 2, pp. 42—50. [In Russ].

14. Ivanov I. Yu., Novokreschenov V. V., Ivanova V. R. Modeling of a section of an electrical network with a longitudinal compensation device for studying parameters affecting the sensitivity of differential protection. *Bulletin ISPEU*. 2025, no. 4, pp. 57—65. [In Russ]. DOI: 10.17588/2072-2672.2025.4.057-065.

15. Dinesh Rangana Gurusinghe, Jagannath Wijekoon Showcasing applications of a multi-zone distance protection relay model using a digital real-time simulator. *PAC World Conference*. 2025.

16. Uakhitova A., Yerbolkyzy G., Tatkeyeva G. Development of a fuzzy logic-based model for assessing the reliability of relay protection systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024, vol. 4, no. 2(130), pp. 67—77. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.310549.

17. Weiwen Xiao, Xinfand Ren Artificial intelligence algorithms enhancing relay protection and operational efficiency in high and low voltage distribution networks. *Intelligent Decision Technologies*. 2025, vol. 19, no. 5. DOI: 10.1177/18724981251355872.

18. Ubong Sebastian Ekop, Ekom E. Okpo, Anyanime Tim Umoette Application of intelligent overcurrent relays for real-time protection of induction motor under fault conditions. *Journal of Engineering Research and Reports*. 2025, vol. 27, no. 3, pp. 489—510. DOI: 10.9734/jerr/2025/v27i31447.

19. Penghuan Yan. Development status and prospects of relay protection technology in smart grids. *Highlights in Science, Engineering and Technology*. 2025, vol. 155, pp. 41—48. DOI: 10.54097/ghpfxv49.

20. Tao Wen, Wei Liu, Shaolin Jiao, Jia Zhu Quantitative evaluation method of operation reliability of substation relay protection device based on improved neural network algorithm. *Journal of Physics Conference Series*. 2024, vol. 2704, no. 1, article 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/2704/1/012002.

21. Shihang Gao, Yulong Ma, Fengrong Zhao, Zhiyang Zou Single Event effect protection design of output module of relay protection device. *Journal of Physics Conference Series*. 2024, vol. 2785, no. 1, article 012027. DOI: 10.1088/1742-6596/2785/1/012027.

22. Belozerov P. A., Shevchenko T. Y. Automation of transformer relay protection design. *Young Researcher of the Don*. 2020, no. 6, pp. 39—43. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Дмитриева Валерия Валерьевна[1] — канд. техн. наук,
доцент, доцент, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8740-9380,
Аринич Александр Эдуардович[1] — магистрант,
e-mail: arinicsasa726@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0001-0803-6046,
Кравченко Варвара Александровна[1] — студент,
e-mail: varya_krh19@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0001-3328-122X,
Сизин Павел Евгеньевич — канд. физ.-мат. наук,
доцент, НИТУ МИСИС, e-mail: mstranger@list.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8156-4972.2,
[1] Российский государственный университет нефти и газа
(национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина.
Для контактов: Сизин П.Е., e-mail: mstranger@list.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Dmitrieva[1], Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,
Assistant Professor, e-mail: dm-valeriya@yandex.ru,
ORCID ID: 0000-0002-8740-9380,
A.E. Arinich[1], Master's Student, e-mail: arinicsasa726@gmail.com,
ORCID ID: 0009-0001-0803-6046,
V.A. Kravchenko[1], Student, e-mail: varya_krh19@mail.ru,
ORCID ID: 0009-0001-3328-122X,
P.E. Sizin, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Assistant Professor,
NUST MISIS, 119049, Moscow, Russia, e-mail: mstranger@list.ru,
ORCID ID: 0000-0001-8156-4972.2,
[1] Gubkin Russian State University of Oil and Gas
(National Research University), 119991, Moscow, Russia.
Corresponding author: P.E. Sizin, e-mail: mstranger@list.ru.

Получена редакцией 03.12.2025; получена после рецензии 09.02.2026; принята к печати 10.04.2026.
Received by the editors 03.12.2025; received after the review 09.02.2026; accepted for printing 10.04.2026.