

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ЗАРЯДКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ В ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р.Н. Латышев¹, Е.Ю. Абрамов¹, А.А. Чернов¹, Д.П. Кравченко¹

¹ Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация: В статье показана тенденция увеличения количества техники на электрической тяге на объектах горной промышленности и отмечена важность обеспечения качественного и безопасного процесса заряда бортовых аккумуляторов в сложных условиях горнодобывающих предприятий. Предложена разработка специальных технических средств, как для целей тестирования зарядных станций при серийном производстве, так и при их проверке и техническом обслуживании на эксплуатирующих предприятиях. Представлена разработка имитационной модели системы заряда переменным током «зарядная станция – электромобиль», выполненная в среде MATLAB и предназначеннная для отладки всех функций, предусмотренных стандартами ГОСТ Р МЭК 61851 и SAE J1772. При сопоставлении с требованиями, регламентированными в стандартах, сделан вывод, что последовательность выполняемых действий, параметры сигналов, интервалы времени между состояниями в имитационной модели полностью соответствует данным требованиям. На основе имитационной модели выполнена разработка аппаратной и программной частей лабораторной исследовательской установки, в которой реализованы силовая часть и система управления зарядной станции, а также система, эмулирующая режимы работы электромобиля. Реализовано программное обеспечение, которое позволяет выполнять тестирование работы зарядных станций для проверки соответствия требованиям действующих стандартов и может быть доработано в соответствии с отраслевой нормативной документацией, что важно для объектов с повышенными требованиями к безопасности, к которым относятся горнодобывающие предприятия.

Ключевые слова: горнодобывающие предприятия, электротранспортное средство, зарядная станция переменного тока, электробезопасность, имитационная модель, соответствие требованиям стандартов, контроллер, тестовое программное обеспечение.

Для цитирования: Латышев Р.Н., Абрамов Е.Ю., Чернов А.А., Кравченко Д.П. Разработка системы зарядки электромобилей переменным током в горнодобывающей промышленности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 10-1. – С. 292–311. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_292.

The development of a system for charging electric vehicles with alternating current in the mining industry

R. N. Latyshev¹, E. Yu. Abramov¹, A. A. Chernov¹, D. P. Kravchenko¹

¹ Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: This article shows the trend of increasing the number of electric traction vehicles at mining facilities and notes the importance of ensuring a high-quality and safe process of

© Р.Н. Латышев, Е.Ю. Абрамов, А.А. Чернов, Д.П.Кравченко. 2023

charging onboard batteries in difficult conditions of mining enterprises. The development of special technical means is proposed, both for the purposes of testing charging stations during mass production, and during their inspection and maintenance at operating enterprises. The development of a simulation model of an alternating current charging system “charging station-electric vehicle”, made in the MATLAB application software package and designed to debug all functions provided for by GOST R IEC 61851 and SAE J1772 standards, is presented. When compared with the requirements regulated in the standards, it is concluded that the sequence of actions performed, signal parameters, time intervals between states in the simulation model fully meets these requirements. Based on the simulation model, the hardware and software parts of the laboratory research facility were developed, in which the power part and the control system of the charging station, as well as a system emulating the operating modes of an electric vehicle were implemented. Software that allows testing the operation of charging stations to verify compliance with the requirements of current standards has been implemented. It can be finalized in accordance with industry regulatory documentation, which is important for facilities with increased safety requirements, which include mining enterprises.

Key words: mining, electric vehicle, AC charging station, electrical safety, simulation model, standards compliance, controller, test software.

For citation: Latyshev R. N., Abramov E. Yu., Chernov A. A., Kravchenko D. P. The development of a system for charging electric vehicles with alternating current in the mining industry. *MiAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023;(10-1):292–311. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_101_0_292.

Введение

В шахтах и рудниках традиционно использовали технику с дизельными двигателями внутреннего сгорания (ДВС) для выполнения разнообразных производственных задач. На горнодобывающую технику сегодня приходится от 30 до 50% прямых выбросов углекислого газа на рудниках от общего объема. Во всем мире эксплуатируются около 28 тысяч больших дизельных карьерных самосвалов с потреблением около 900 тысяч литров дизельного топлива в год. Это соизмеримо с выбросами более 68 миллионов тонн CO₂ [1]. Разработка месторождений во всем мире становится дороже, сложнее и дальше из-за необходимости увеличивать глубину разработок, что усугубляет проблемы, связанные с недостатками автотранспортной техники [2]:

- низкий КПД (35–40%) использования энергии и большие тепловыделения;
- низкая перегрузочная способность;
- высокие затраты на техническое обслуживание;

– трудоемкость технического обслуживания;

- высокий уровень шума (~ 105 дБ);
- образование тумана;
- сложность транспортировки топлива в глубоких шахтах.

. В результате обозначенных проблем горнодобывающими компаниями и исследовательскими институтами был запущен ряд проектов в области устойчивого развития отрасли, направленных на поддержку инноваций и ускорение внедрения нового оборудования, включая электромобили. Так, электрификация автомобильного парка на медных рудниках позволит сократить использование дизельного топлива на 6,1 миллиардов литров в год [3]. В ЕС был профинансирован проект в рамках программы «Горизонт-2020» под названием SIMS (Sustainable Intelligent Mining Systems), который утвержден консорциумом горнодобывающих компаний, поставщиками оборудования и рядом университетов [4]. Существует глобальная руководящая

организация «Международный совет по горному делу и металлам» (ICMM), деятельность которой направлена на устойчивое развитие горнодобывающих предприятий; основной целью её проектов являются инновации для более чистых и безопасных транспортных средств, в том числе внедрение к 2040 году техники на электрической тяге для горных работ без выбросов парниковых газов [5].

Электрические транспортные средства имеют многочисленные преимущества [6,7]:

1) безопасность – устранение потенциального источника воспламенения в виде топлива. Кроме этого, техника с аккумуляторным питанием, в отличие от систем с контактной сетью, снижает риск возгораний и поражения электрическим током в суровых условиях добычи;

2) здоровье рабочих – устранение проблем с качеством воздуха за счет сокращения образования пыли, снижения выбросов дизельных твердых частиц (DPM – Diesel Particulate Matters) и других, связанных с эксплуатацией дизельных двигателей. Снижение уровня шума и вибрации, высокого тепловыделения ДВС;

3) эксплуатационные расходы – сокращение затрат энергии на вентиляцию и кондиционирование. Например, исследование [8] показывает, что за счет электрификации транспорта в шахте, Канада, может быть достигнута экономия энергии вентиляции на 40% и охлаждения на 30%. Устранение затрат на дизельное топливо – закупка, транспортировка, подземное распределение и хранение на поверхности. Снижение затрат на техническое обслуживание техники за счёт более простой и надёжной конструкции электропривода [9];

4) эксплуатационные характеристики – более высокая энергоэффек-

тивность (около 90%), постоянный крутящий момент, включая высокий момент на низких скоростях [10].

Обозначенные преимущества и реализация инициативных проектов обуславливают постепенное внедрение в горнодобывающую промышленность разнообразной техники на электрической тяге для выполнения широкого спектра технологических задач. На практике наблюдается использование электротранспортных средств разных производителей – Bortana EV, Tembo e-LV, TRITEV и др., которые оснащаются различными видами зарядных интерфейсов, каждый из которых имеет свои особенности [11].

Таким образом, встает вопрос организации качественного и безопасного заряда бортовых аккумуляторов электротранспортных средств в условиях горной промышленности. Благодаря высокой доступности источника питания 230/400 В стации для зарядки электромобилей переменным током получили широкое распространение в городских условиях, они также нашли применение на горнодобывающих предприятиях для заряда аккумуляторов электротранспортных средств с сравнительно малой энергоемкостью (30...100 кВт·ч). Требования к этому типу зарядных станций описывают стандарты МЭК 61851 [Electric Vehicle Conductive Charging System. Part 1: General Requirements IEC 61851-1] и SAE J1772 [SAE Electric Vehicle and Plug In Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler], которые определяют рабочие условия источников питания, их подключения к электротранспортному средству, а также требования электробезопасности и характеристики зарядных электроустановок. Также следует отметить, что к электроустановкам, работающим на горнодобывающих предприятиях,

предъявляются повышенные требования безопасности из-за специфики условий окружающей среды.

С увеличением разнообразия применяемых моделей электротранспортных средств и зарядных станций разных производителей возникает необходимость проверки совместимости между компонентами и соответствия оборудования требованиям действующих стандартов и отраслевой нормативной документации. То есть требуются специальные технические средства как для целей тестирования зарядных станций при серийном производстве, так и при их проверке и техническом обслуживании на эксплуатирующих предприятиях [12].

В данной статье представлена разработка имитационной модели системы «зарядная станция – электромобиль», выполненная в среде MATLAB и предназначенная для отладки всех функций, предусмотренных стандартами ГОСТ Р МЭК 61851 и SAE J1772 для заряда переменным током. Результаты моделирования будут использоваться при создании специализированного контроллера зарядной станции и системы тестирования для проверки на соответствие рабочих параметров зарядных электроустановок требованиям действующих стандартов.

Для разработки имитационной модели системы «зарядная станция – электромобиль» необходимо:

1) смоделировать силовую часть зарядной станции и электромобиля с бортовым зарядным устройством;

2) реализовать логику работы системы управления зарядной станцией;

3) обеспечить передачу сигналов управления *control pilot* (*CP*) и *proximity pilot* (*PP*).

2. Имитационная модель системы «зарядная станция – электромобиль»

Общий вид разработанной имитационной модели представлен на рис. 1. Она состоит из трехфазного источника питания с линейным напряжением 400 В и частотой 50 Гц (*Power supply*); входного автоматического выключателя (*Circuit breaker*); устройства дифференциальной защиты (*RCD*); электромагнитного контактора (*Contactor*); подсистемы, формирующей сигнал управления (*Control Pilot*); подсистемы имитации паразитных параметров зарядного интерфейса (*Parasitic parameters*); подсистемы ограничения параметров в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61581 (*Limiting parameters*); коннектора (*Connector*), включающего в себя подсистему *Proximity pilot*; электромобиля (*Electric Vehicle*) с системой управления аккумуляторной батареей (*BMS*) [13] и бортового AC/DC преобразователя с аккумулятором (*Charger + Battery*) [14], выполняющего функции зарядного устройства.

Входные данные модели, необходимые для её корректной работы при имитации процесса заряда электромобиля, задаются в подсистеме *Data Input*, они представлены на рис. 2: уставка тока, запрашиваемая электромобилем; уставка времени заряда электромобиля; уставка тока зарядной станции, которая пересчитывается в коэффициент заполнения ШИМ управляющего сигнала *CP*, передаваемого электромобилю; момент времени подключения и отключения зарядного кабеля; требование электромобиля о необходимости дополнительной вентиляции, где 0 – вентиляция не нужна, 1 – вентиляция нужна; положение контакта кнопки коннектора зарядного кабеля для определения состояния подключения, где 0 – контакт замкнут, 1 – контакт разомкнут.

Подсистема измерений *Measurements* имитационной модели зарядной

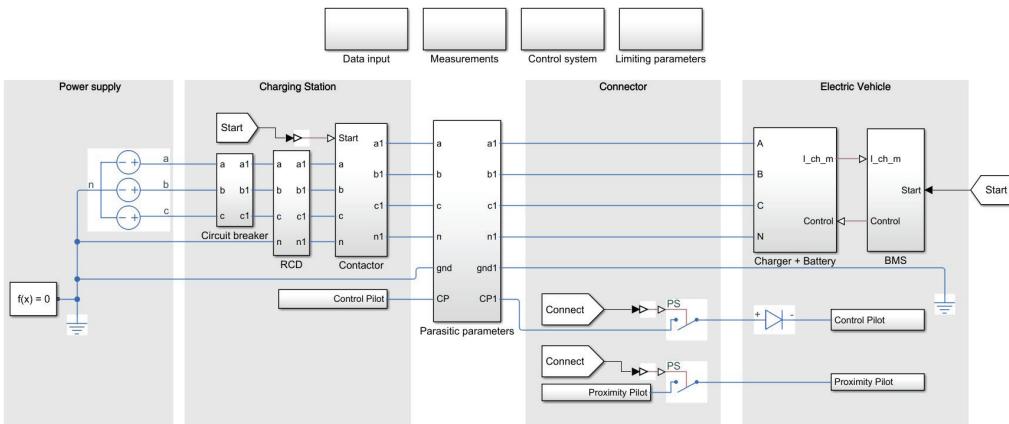


Рис. 1. Базовая модель системы «зарядная станция – электромобиль»
Fig. 1. Basic electric vehicle supply equipment – electric vehicle model

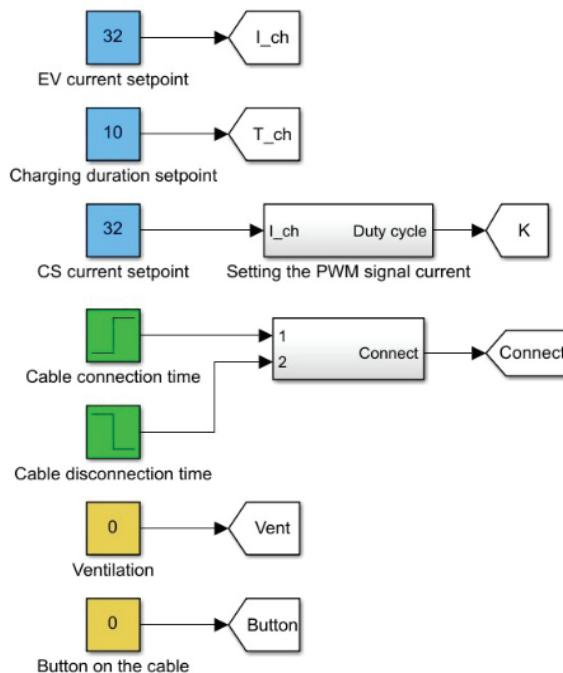


Рис. 2. Входные данные модели
Fig. 2. Data Input subsystem

станции состоит из нескольких блоков, которые представлены на рис. 3. Они включают виртуальные приборы для вывода значений параметров и осциллографов сигнала управления CP со стороны зарядной станции

и электромобиля, таких как период, частота и коэффициент заполнения, время нарастания и спада импульсов ШИМ, амплитуда положительного и отрицательного напряжения сигнала, а также для вывода состояний электро-

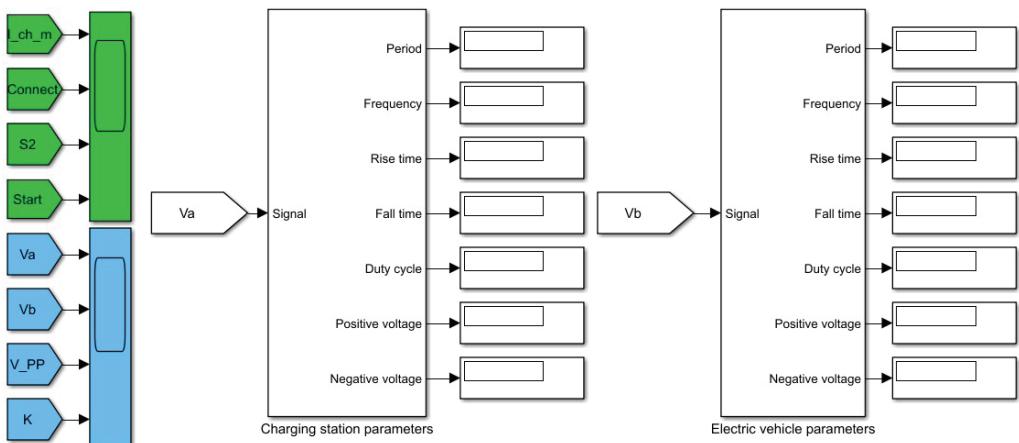


Рис. 3. Выходные данные модели
Fig.3. Measurements subsystem

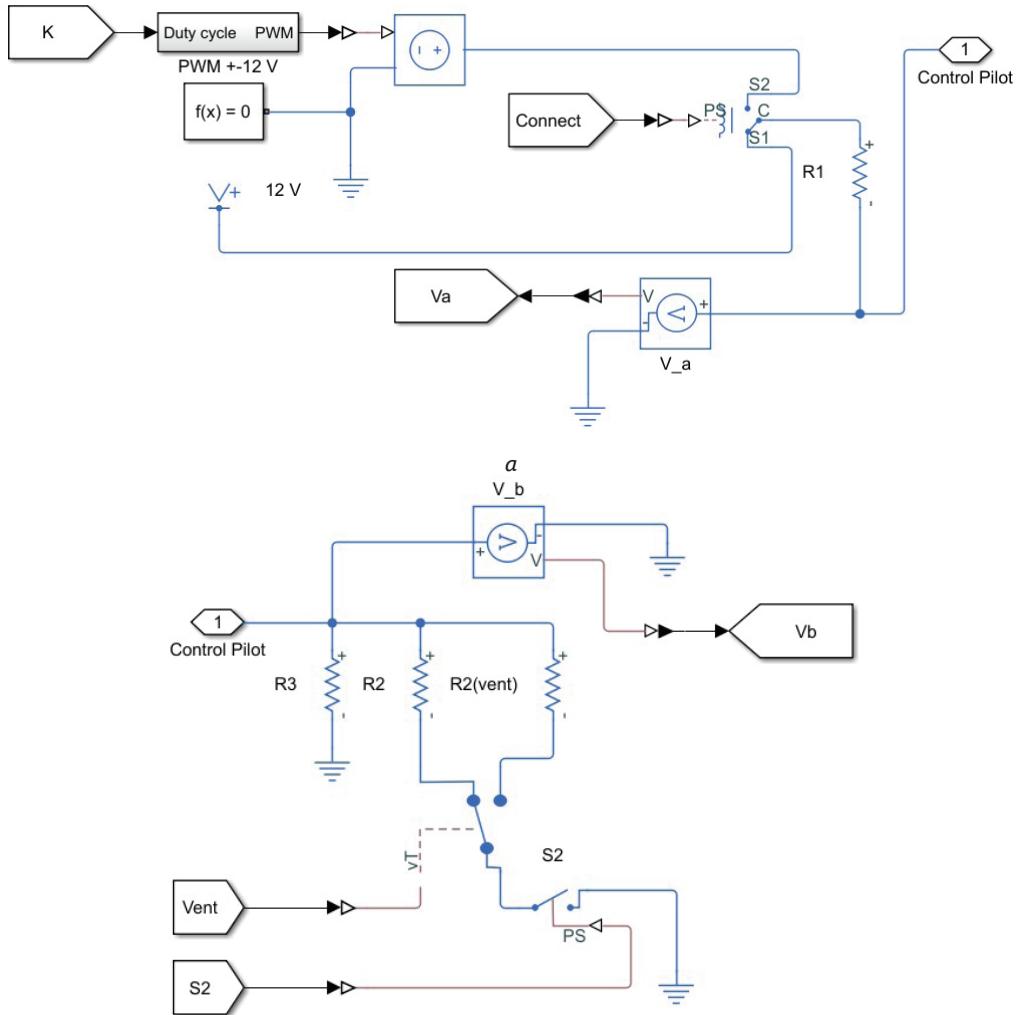
магнитного контактора зарядной станции и контактора электромобиля (S_2), состояний коннектора зарядного кабеля и осцилограмм тока заряда электромобиля и напряжения сигнала proximity pilot. Контролируя данные параметры, можно отследить весь цикл зарядки и выполнить проверку их соответствия требованиям действующих стандартов.

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 61851 и SAE J1772 в имитационной модели реализован следующий алгоритм работы системы управления зарядной станции переменного тока. В начальный момент времени электромобиль не подключен к зарядной станции (состояние A). Напряжение сигнала CP $V_a = 12$ В (рис. 4) [15]. В момент времени 0,5 с моделируется подключение коннектора зарядного кабеля к электромобилю (состояние B). Система управления, приведенная на рис. 5, обнаруживает это состояние по уровню напряжения CP $V_a = 9$ В, полученного на резисторе $R1=1$ кОм в цепи последовательно включенных сопротивлений $R1-R3$, где $R3 = 2.74$ кОм. Если зарядная станция готова для подачи энергии, то по линии CP формируется сигнал ШИМ напряжением ± 12

В с частотой 1 кГц, где коэффициентом заполнения задается доступный для зарядной станции ток. Наличие диода на линии CP со стороны электромобиля определяется напряжением -12 В и дает дополнительную гарантию того, что сигнал 9 В является надежным индикатором подключения транспортного средства. Контакт S_2 на стороне электромобиля замыкается (если вентиляция не нужна, состояние C), при этом напряжение сигнала CP падает до $V_a=6$ В или $V_a=3$ В (если вентиляция нужна, состояние D), и тем самым транспортное средство сообщает зарядной станции о своей готовности к зарядке. Изменение напряжения CP до указанного уровня осуществляется подключением в цепь параллельного сопротивления $R2 = 1.3$ кОм или $R2vent = 270$ Ом.

В состоянии C система управления зарядной станции (см. рис. 6) подает сигнал $Start$ на свой контактор, тем самым замыкая его контакты. Если обнаружено состояние D, контактор зарядной станции замкнется только в том случае, если будут соблюдены требования к вентиляции.

Сигнал управления $Start$ также передается на систему управления



6

Рис. 4. Подсистема control pilot: а – со стороны зарядной станции; б – со стороны электромобиля

Fig. 4. Control pilot subsystem: a – is the charging station side; b – is the electric vehicle side

батареей, представленную на рис. 6. Данная система выполнена в упрощенном виде с PID-регулированием тока по обратной связи для проверки передачи сигналов и проверки системы управления. В момент подачи сигнала *Start* срабатывает блок задержки команды, обеспечивающий время

задержки при включении контактора зарядной станции. После окончания задержки включается таймер зарядки, время которого задается в подсистеме ввода данных. Ток линейно нарастает до заданной уставки электромобиля, далее остается постоянным до истечения времени зарядки [16].

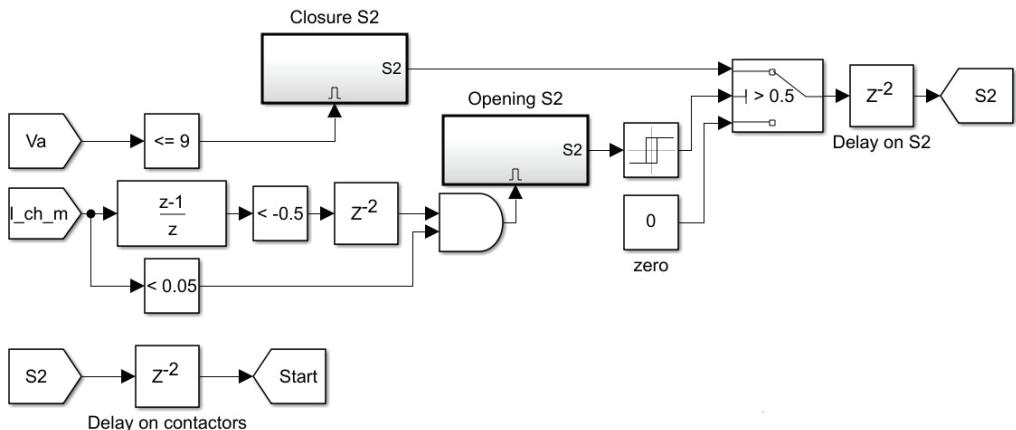


Рис. 5. Система управления
Fig. 5. Subsystem of the control system

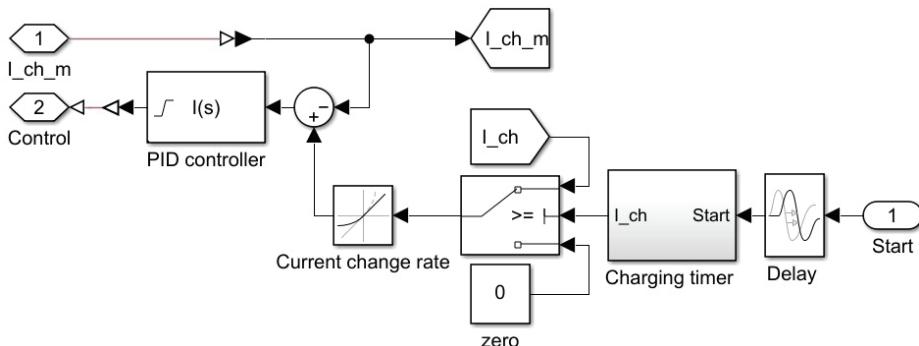


Рис. 6. Подсистема BMS
Fig. 6. BMS subsystem

Окончание заряда определяется транспортным средством. По истечении времени таймера уставка тока меняется на 0 и значение тока линейно убывает. Как только значение тока снижается до 0, система управления подает сигнал на отключение контактора электромобиля. Зарядная станция обнаруживает состояние B , созданное размыканием $S2$ на электромобиле, и размыкает свой контактор.

Подсистема *proximity pilot* размещена в коннекторе зарядного кабеля (рис. 7), который вставляется в электромобиль. Она включает два резистора $R6 = 150 \text{ Ом}$, $R7 = 330 \text{ Ом}$ и контакт

кнопки. Со стороны электромобиля через делитель напряжения с сопротивлениями $R4 = 330 \text{ Ом}$ и $R5 = 2700 \text{ Ом}$ на линию *proximity pilot* подается постоянное напряжение 5 В. При подключенном к электромобилю зарядном коннекторе и нажатии кнопки электромобиль считывает напряжение на линии *proximity pilot* и передает сигнал управления на отключение контактора зарядной станции по СР.

Задачей этой подсистемы является обеспечение гарантированного отключения питания при отсутствии физического подключения — зарядный коннектор должен быть обесточен, когда

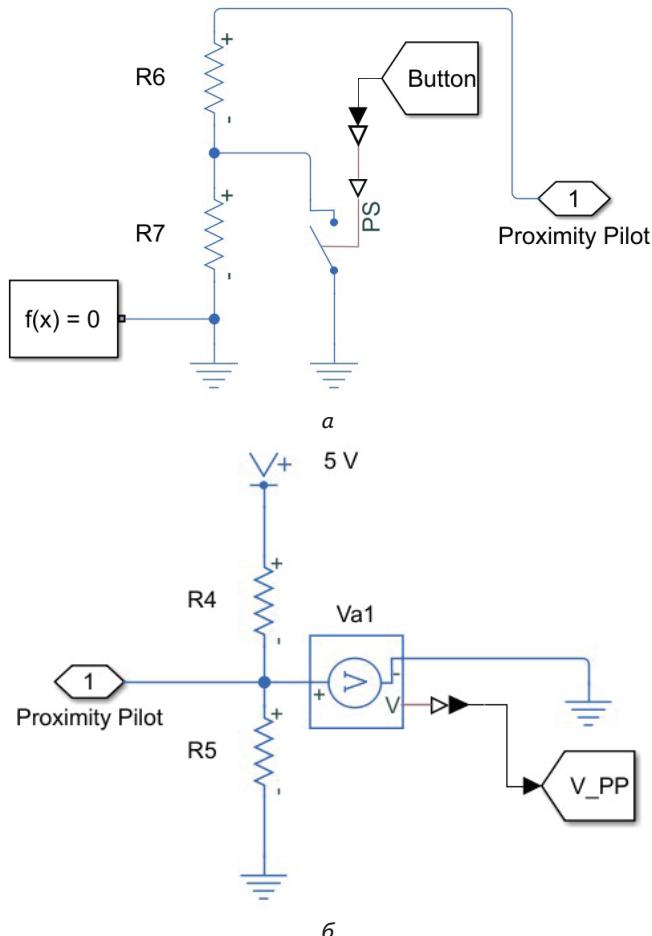


Рис. 7. Подсистема proximity pilot: а – в коннекторе зарядного кабеля; б – со стороны электромобиля

Fig. 7. Proximity pilot subsystem: a – is in the charging cable connector; b – is on the electric vehicle side

не находится в зарядном порту электромобиля и электромобиль не требует зарядки.

3. Исследовательская лабораторная установка

На основе представленной имитационной модели на базе кафедры электротехнических комплексов НГТУ выполнена разработка аппаратной и программной частей лабораторной исследовательской установки, которая представлена на рис. 8. На стойке, рас-

положенной слева, размещена силовая часть и система управления зарядной станции переменного тока. Справа же размещена стойка с системой управления, эмулирующей режимы работы электромобиля при заряде переменным током, а также система, эмулирующая аккумуляторную батарею электромобиля.

Силовая часть установки со стороны зарядной станции переменного тока включает автоматический выключатель, предназначенный для защиты

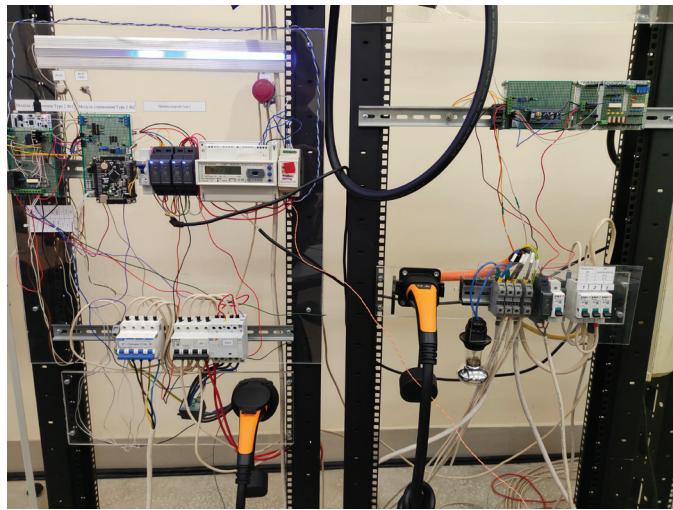


Рис. 8. Стенд опытного образца зарядной станции переменного тока и эмулятора электромобиля

Fig. 8. The stand of a prototype of an AC charging station and an electric car emulator

от короткого замыкания и перегрузки, а также электромагнитный контактор с дополнительным контактом для обратной связи с системой управления. Управление катушкой контактора реализовано через оптическую развязку и промежуточное реле. В случае подачи дискретного сигнала со стороны контроллера на оптрон реле замыкает свои контакты, обеспечивая однофазное питание катушки силового контактора. Обязательным защитным аппаратом в зарядных станциях переменного тока является реле тока утечки типа В, реализующее функции дифференциальной защиты по синусоидальному переменному, пульсирующему постоянному (выпрямленному) и постоянному току утечки на землю. В основном распространена реализация передачи сигнала данного аппарата об аварии только на контроллер системы управления, который впоследствии по заданному алгоритму производит отключение силового контактора. В дополнение к передаче сигнала утечки тока на контроллер реализовано прямое отклю-

чение контактора при срабатывании этого реле. Это увеличивает безопасность эксплуатации зарядной станции, что актуально для объектов с повышенными требованиями к электробезопасности, к которым относятся и горнодобывающие предприятия.

Система управления установкой со стороны зарядной станции реализована на макетных платах с использованием микроконтроллера STM32F429; структура этой системы представлена на рис. 9, её функции включают: формирование двухполлярного сигнала СР; измерения параметров сигнала СР; управление силовым контактором и контроль состояния реле тока утечки; контроль состояния силового контактора через дополнительный контакт; контроль состояния кнопок «Пуск» и «Стоп»; управление вентиляцией с помощью реле; отладка МК по интерфейсу SWD; коммуникация с верхним контроллером по интерфейсу RS-485; логирование по интерфейсу UART; контроль наличия заземления; измерение сигнала РР; управление адресной

DO - дискретный выход
 DI - дискретный вход
 AI - аналоговый вход

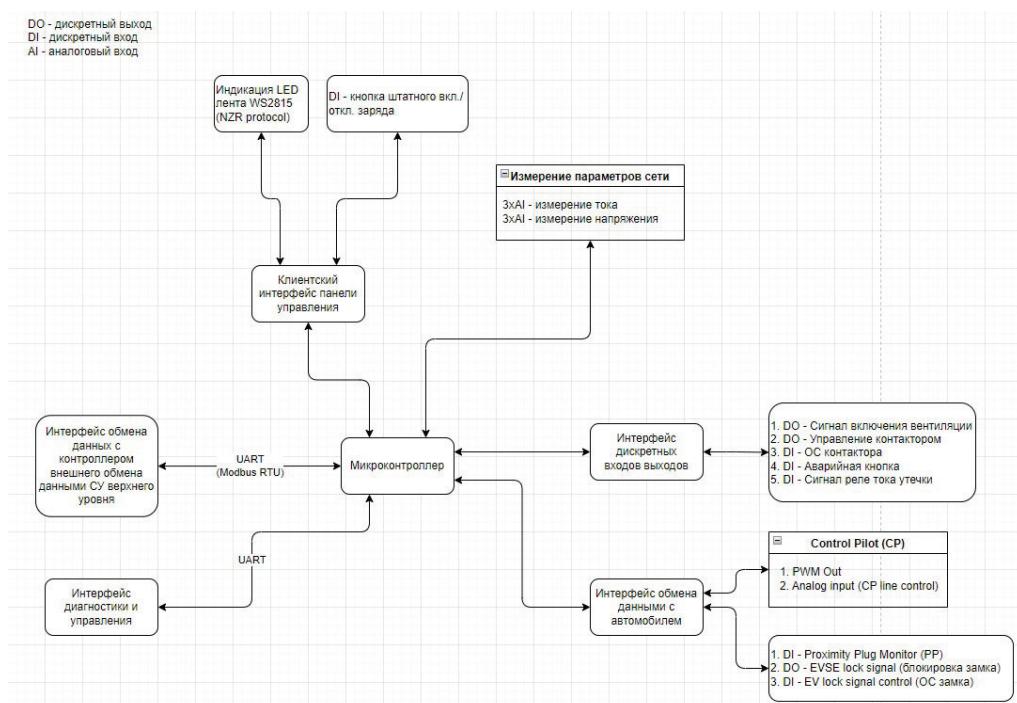


Рис. 9. Структура контроллера управления зарядной станцией
Fig. 9. Structure of the charging station control controller

LED-лентой; контроль и управление ЭМ замком розетки.

Основным параметром системы управления является измеряемое с помощью АЦП напряжение control pilot. Для обеспечения качественного измерения положительной и отрицательной амплитуды ШИМ-сигнала реализована аналоговая схема с пиковыми детекторами на базе операционных усилителей. ШИМ-сигнал формируется по линии control pilot с уровнями ± 12 В, а на два аналоговых входа контроллера поступают сигналы в диапазоне 0–3,3 В.

Еще одним сигналом, требующим измерения, является *proximity pilot*. Для зарядных станций переменного тока с зарядным кабелем измерение данного сигнала не требуется, а в случае зарядной станции с встроенной

розеткой необходимо контролировать корректность подключения зарядного кабеля – как к электромобилю, так и к зарядной станции, что осуществляется измерением сигнала *proximity pilot*. После успешного подключения системой управления подается сигнал блокировки коннектора в розетке со стороны зарядной станции и со стороны электромобиля.

Обязательным условием работы зарядной станции переменного тока является проверка наличия заземления, которая реализована с использованием оптической развязки. В случае отсутствия заземляющего проводника на контроллер системы управления поступает дискретный сигнал о запрете работы [17].

Для управления и мониторинга информации с контроллера системы

управления зарядной станцией использован протокол Modbus RTU. Для осуществления измерений и учета активной электрической энергии в трехфазных четырехпроводных цепях переменного тока с возможностью учета в одном или двух направлениях использован трехфазный многофункциональный электросчетчик СЕ301 с передачей информации через оптопорт и цифровой интерфейс RS-485. Для согласования протокола электросчетчика с протоколом Modbus RTU подключен специализированный конвертер протокола.

К дискретным выводам контроллера системы управления подключены пользовательские кнопки запуска и аварийной остановки зарядной сессии. Для индикации состояния зарядной станции установлена адресная светодиодная лента на базе чипов WS2815, управляемая контроллером через биполярный npn-транзистор.

Система управления установкой со стороны эмулятора электромобиля реализована на макетных платах с использованием микроконтроллера STM32F103, её функции включают: измерения параметров сигнала СР и РР с помощью АЦП и управление транзистором для подключения дополнительного резистора в схему управления. Для обеспечения качественного измерения положительной и отрицательной амплитуды ШИМ-сигнала аналогично схеме зарядной станции реализована аналоговая схема с пиковыми детекторами.

Разработано программное обеспечение для контроллеров системы управления исследовательской установки со стороны зарядной станции и с ответной стороны, эмулирующей электромобиль. Фрагмент листинга программного кода управления зарядной станцией представлен на рис. 10.

В главной ветке программы реализованы основные функции измерения и управления. Как видно на верхней части рис. 10, в программе были созданы классы для управления различной периферией микроконтроллера, к которым обращение идет с главного цикла программы.

4. Результаты и обсуждение

В результате имитационного моделирования получен график изменения тока заряда электромобиля на всем протяжении зарядной сессии, который представлен на рис. 11.

Видно правильную работу системы управления после присоединения коннектора зарядного кабеля к электромобилю — первой замыкает свой контактор система управления электромобиля, тем самым сообщая зарядной станции, что электромобиль готов к заряду. Окончание заряда может происходить по инициативе пользователя или автоматически по команде электромобиля при достижении полного уровня заряда аккумулятора. В модели это реализовано таймером зарядки — как только время зарядки вышло, система управления электромобиля снижает ток заряда до нуля и отключает свой контактор.

На рис. 12 представлены осциллограммы ШИМ-сигнала, измеряемые как со стороны зарядной станции, так и со стороны электромобиля.

Данные осциллограммы отображают правильную работу зарядной станции и электромобиля в соответствии со стандартом IEC 61851 [18]. Отрицательная часть со стороны зарядной станции генерируется в целях безопасности, чтобы определить работоспособность схемы управления на стороне электромобиля по состоянию, предусмотренному для этого диода. Если диод работоспособен, то отрицательная часть сигнала не изменится. Как видно

```

270 // -----
271 // функции измерения периода и скважности сигнала CP
272 void CpFreqMesureInit(cp_freq_duty_t *cp_FreqDuty, uint8_t periodFiltrDepth, uint8_t pulseFiltrDepth)
273 {
274     memset(cp_FreqDuty, 0, sizeof(cp_freq_duty_t));
275
276     cp_FreqDuty->PeriodFiltrDepth = periodFiltrDepth;
277     cp_FreqDuty->PulseFiltrDepth = periodFiltrDepth;
278
279     HAL_TIM_Base_Start_IT(&TIMER_CP_FREQ_DUTY);
280     HAL_TIM_IC_Start_IT(&TIMER_CP_FREQ_DUTY, CP_TIM_CHANNEL_DIRECT);
281     HAL_TIM_IC_Start_IT(&TIMER_CP_FREQ_DUTY, CP_TIM_CHANNEL_INDIRECT);
282 }
283
284 uint16_t GetCpDepthPercent(void)
285 {
286     uint16_t modulo = CP_FreqDuty.PulseWidth%10;
287     uint16_t pulse_width = CP_FreqDuty.PulseWidth/10;
288
289     if(modulo >= 5)
290         ++pulse_width;
291
292     return pulse_width;
293 }
294
295 uint16_t GetCpPeriodInUs(void)
296 {
297     return CP_FreqDuty.Period;
298 }
299
300 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
301 {
302     if (htim == &TIMER_CP_FREQ_DUTY)
303     {
304         if(HAL_GPIO_ReadPin(CP_FREQ_IN_GPIO_Port, CP_FREQ_IN_Pin) == GPIO_PIN_RESET)
305         {
306             CP_FreqDuty.Period = CP_FreqDuty.PulseWidth = 0;
307         }
308         else
309         {
310             CP_FreqDuty.Period = CP_PERIOD_MAX_VALUE;
311             CP_FreqDuty.PulseWidth = CP_PERIOD_MAX_VALUE;
312         }
313     }
314 }
...

```

Рис. 10. Часть реализации программного кода
Fig. 10. Part of the program code implementation

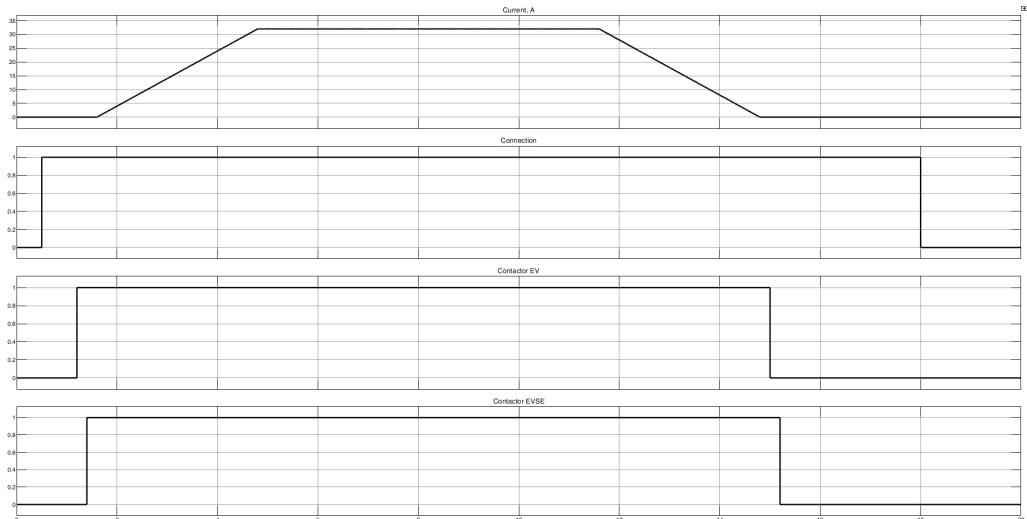


Рис. 11. График тока заряда электромобиля и состояния контакторов
Fig. 11. Resulting graphs of the electric vehicle charge current and contactor status

на графике, со стороны электромобиля отрицательная часть сигнала не проходит из-за работы диода. Если в части отрицательного сигнала обнаружено

изменение, контактор отключается по соображениям безопасности. Также на рис. 12 представлены графики изменения напряжения на proximity pilot,

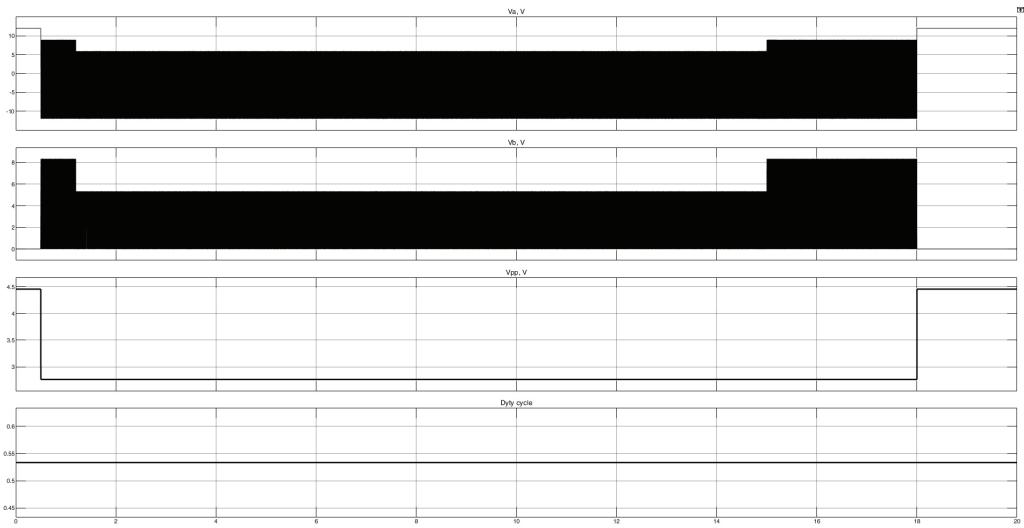


Рис. 12. Осциллографмы сигнала ШИМ, график напряжения на РР и скважность сигнала ШИМ

Fig. 12. Oscilloscopes of the PWM signal, graph of voltage on the PP and duty cycle of the PWM signal

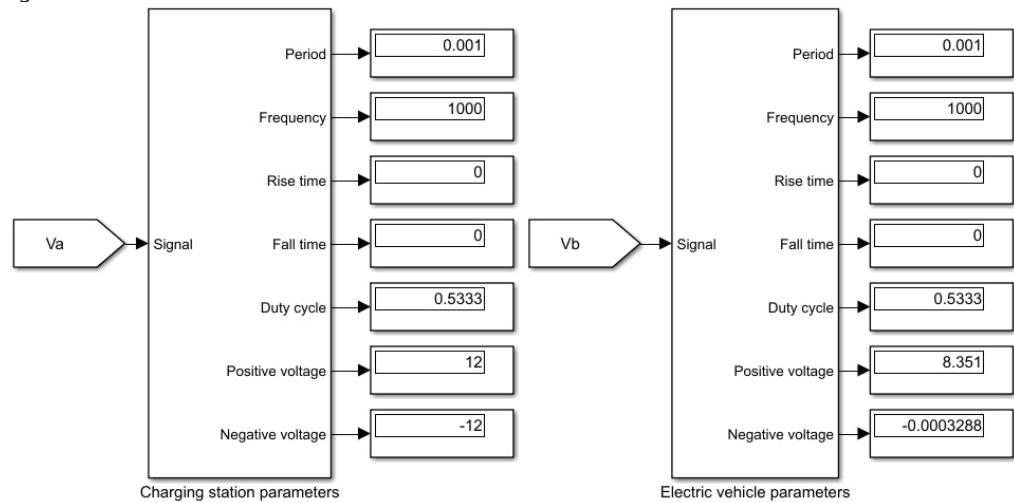


Рис. 13. Измеренные значения параметров сигнала ШИМ

Fig. 13. Measured values of PWM signal parameters

дублирующие проверку присоединения зарядного коннектора к электромобилю, и коэффициента заполнения ШИМ-сигнала. На рис. 13 выведены параметры ШИМ-сигнала, по которым можно оценивать его качество и тестировать неполадки.

При сопоставлении с требованиями, регламентированными в стандартах МЭК 61851 и SAE J1772 для зарядных устройств переменного тока, можно сделать вывод, что последовательность выполняемых действий, параметры сигналов, интервалы времени между состо-

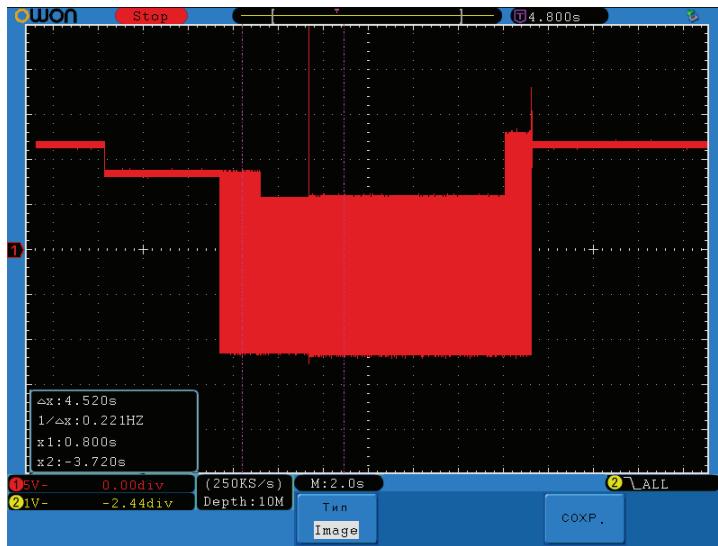


Рис. 14. Осциллографы сигнала ШИМ
Fig. 14. Oscilloscopes of the PWM signal

яниями в имитационной модели полностью соответствует данным требованиям.

Также получена осциллограмма сигнала СР с лабораторной исследовательской установки, которая представлена на рис. 14.

Как видно по изменениям уровня амплитуды сигнала ШИМ, данный процесс зарядки совпадает с осциллограммой, полученной на имитационной модели. На осциллографе видны колебания постоянного сигнала, а также помехи, возникающие при срабатывании контактора зарядной станции.

Для тестирования работы зарядных станций и мониторинга параметров зарядных сессий реализовано программное обеспечение, интерфейс которого представлен на рис. 15.

Данное ПО позволяет проверить работоспособность зарядной станции, получить данные об ошибках, возникающих при некорректном процессе зарядной сессии, отслеживать этапы выполнения процесса зарядки в виде графиков и индикации состояний, вести журнал событий.

5. Заключение

В статье представлена разработка имитационной модели системы «зарядная станция — электромобиль», выполненная в среде MATLAB. В данной модели реализованы отладка всех функций в соответствии со стандартами МЭК 61851 и SAE J1772 для зарядных станций переменного тока, формирование сигналов управления в соответствующих блоках *control pilot* и *proximity pilot*, логика системы управления зарядной станцией, которая выводится в виде осциллограмм. Получены график изменения тока заряда электромобиля на всем протяжении зарядной сессии, осциллографмы ШИМ-сигнала, измеряемые как со стороны зарядной станции, так и со стороны электромобиля, графики изменения напряжения сигнала *proximity pilot*, дублирующего проверку присоединения зарядного коннектора к электромобилю, и коэффициента заполнения ШИМ-сигнала, выведены параметры ШИМ-сигнала, по которым можно оценивать его качество. При сопоставлении с требова-

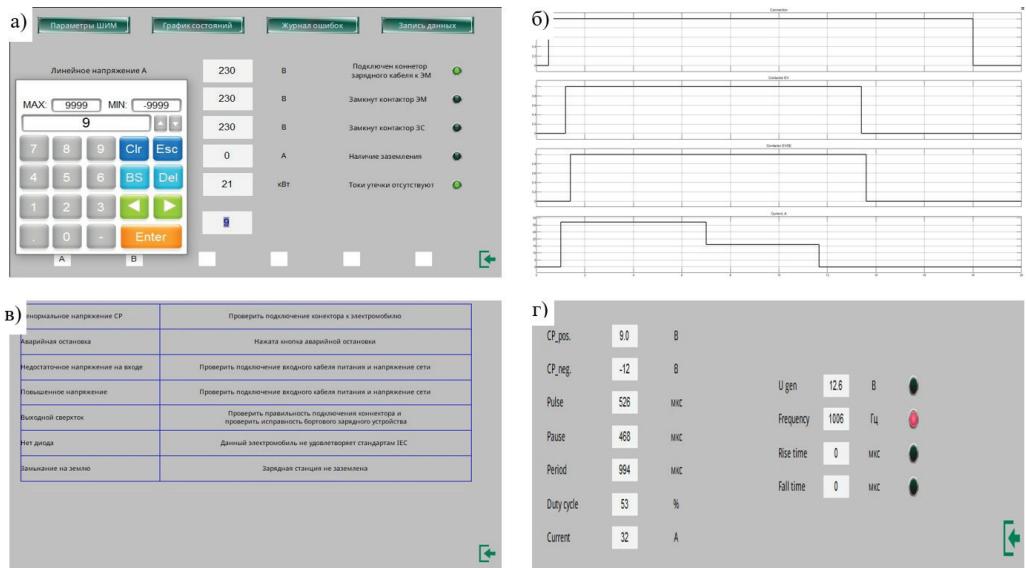


Рис. 15. Тестовое ПО: а – окно состояний зарядной станции; б – окно графиков последовательности состояний; в – журнал ошибок; г – параметры ШИМ
 Fig. 15. Test software: a – Charging station status window; b – State Sequence Graph Window; c – Error log; d – PWM parameters

ниями стандартов сделан вывод, что последовательность выполняемых действий, параметры сигналов, интервалы времени между состояниями в имитационной модели полностью соответствует данным требованиям [19, 20].

На основе имитационной модели выполнена разработка аппаратной и программной частей лабораторной исследовательской установки, в которой реализованы силовая часть и система управления зарядной станции переменного тока, а также система, эмулирующая режимы работы электромобиля. Разработано программное обеспечение для контроллеров системы управления исследовательской установки со стороны зарядной станции и с ответной стороны, эмулирующей электромобиль. Для тестирования работы зарядных станций и мониторинга параметров зарядных сессий реализовано программное обеспечение, которое позволяет проверять работе-

способность зарядных станций, получать данные об ошибках, возникающих при некорректном процессе зарядной сессии, отслеживать этапы выполнения процесса зарядки в виде графиков и индикации состояний, вести журнал событий.

Дальнейшая работа будет направлена на создание отечественного специализированного зарядного контроллера для зарядных станций переменного тока, а также комплексной системы для задач воспроизведимого тестирования зарядных электроустановок на соответствие требованиям действующих стандартов, включая предельные эксплуатационные показатели, регрессионного тестирования, ресурсных испытаний, проверки электромагнитной совместимости. Эти результаты могут быть вос требованы при серийном производстве зарядных станций и при их проверке и техническом обслуживании на эксплуатирующих предприятиях, что

особенно важно для объектов с повышенными требованиями к безопасности, к которым относятся горнодобывающие предприятия.

Вклад авторов

Латышев Р. Н. — написание текста статьи, оформление результатов исследований, поиск и анализ библиографической информации, создание модели, анализ результатов и формулировка выводов.

Абрамов Е. Ю. — поиск и анализ библиографической информации, формулирование цели и задач исследования, разработка методики исследования.

Чернов А. А. — поиск и анализ библиографической информации, анализ результатов и формулировка выводов, написание текста статьи.

Кравченко Д. П. — написание текста статьи, оформление результатов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шешко О. Е. Эколого-экономическое обоснование возможности снижения нагрузки на природную среду от карьерного транспорта // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 2. — С. 241–252.
2. Хошмухамедов И. М., Косарева-Володько О. В. Надежность электродвигателей карьерных экскаваторов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 12. — С. 151–156. DOI: 10.25018/0236-14932018-12-0-151–156.
3. Тюленева Т. А. Цифровизация горнодобывающей промышленности региона: проблемы и перспективы // Вестник Сургутского государственного университета. — 2020. — Т.4. — № 30. — С. 25–33. DOI: 10.34822/2312-3419-2020-4-25–33.
4. Vorobiev A. E., Metaksa G. P., Bolenov E. M., Metaksa A. S., Alisheva Zh. N. Digitization of the Mining Industry. Concept and Modern Geotechnology // Изв. Национал. Акад. наук Республики Казахстан. Сер. геологии и техн. наук. — 2019. — Т. 4. — № 436. — С. 121–127.
5. Абрамов Б. И., Иванов А. Г., Шиленков В. А., Кузьмин И. К., Шевырев Ю. В. Электропривод современных шахтных подъёмных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 5–2. — С. 145–162. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.
6. Hristova T. Tracking of the battery materials of electric vehicles in the mining industry via a blockchain // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022, vol. 970, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755–1315/970/1/012012.
7. Никитенко М. С., Кизилов С. А. Технико-технологические платформы для создания роботизированных комплексов по разработке мощных пластовых месторождений // Наукоменные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2019. — № 5. — С. 257–263.
8. Grycan W. Electric Vehicles in Mining for the Aspect of Operational Safety // PRZEGŁĄD ELEKTROTECHNICZNY. 2022, no. 98, pp. 110–113. DOI: 10.15199/48.2022.12.27.
9. Ertugrul N., Kani A. P., Davies M., Sbarbaro D., Moran L. Status of Mine Electrification and Future Potentials // International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES). 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SGES51519.2020.00034.

10. Rodrigues R., Albuquerque V., Ferreira J. C., Dias M. S., Martins A. L. Mining Electric Vehicle Adoption of Users // *World Electr. Veh. J.* 2021, vol. 12 (4), no. 233, pp. 1–31. DOI: 10.3390/WEVJ12040233.
11. Latyshev R. N., Abramov E. Y., Tolstobrova L. I. Charging stations for electric cars using hybrid energy storage systems // *Journal of Physics Conference Series*. 2021, vol. 2061 (1), pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012010.
12. Сафин А. Р., Ившин И. В., Цветков А. Н., Петров Т. И., Босенко В. Р., Монахов В. А. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2021. – Т. 23. – № 5. – С. 100–114. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-3-100-114.
13. Konyukhov V. Y., Oparina T. A., Zagorodnii N. A., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses. *Mathematics* 2023, 11, 3260. DOI: 10.3390/math11153260.
14. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics* 2023, 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
15. Shin M., Kim H., Jang H. Building an interoperability test system for electric vehicle chargers based on ISO/IEC 15118 and IEC 61850 standards // *Applied Sciences*. 2016, vol. 6(6), pp. 1–15. DOI: 10.3390/app6060165.
16. Осоков Д. В., Ляхомский А. В. Моделирование работы карьерных электросамосвалов // *Вестник УГАТУ*. – 2017. – Т. 21. – № 3(77). – С. 72–78.
17. Li X. Y., Huang Z., Tian J., Tian Y. State-of-charge estimation tolerant of battery aging based on a physics-based model and an adaptive cubature Kalman filter // *Energy*. 2021, vol. 220, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119767.
18. Martyushev N. V., Malozyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics*. 2023, vol. 11, p. 536. DOI: 10.3390/math11030536.
19. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.
20. Shchurov N. I., Dedov S. I., Malozyomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. DOI: 10.3390/en14238072. **MIAB**

REFERENCES

1. Sheshko O. E. Ecological and economic substantiation of the possibility of increasing the load on the natural environment from open-pit transport. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 2, pp. 145–162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.
2. Khoshmukhamedov I. M., Kosareva-Volodko O. V. Reliability of electric motors for mining excavators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 12, pp. 151–156. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.
3. Tyuleneva T. A. Digitalization of regional mining industry: problems and prospects. *Surgut State University Journal*. 2020, vol. 4, no. 30, pp. 25–33. [In Russ]. DOI: 10.34822/2312-3419-2020-4-25-33.
4. Vorobiev A. E., Metaksa G. P., Bolenov E. M., Metaksa A. S., Alisheva Zh. N. Digitization of the Mining Industry. Concept and Modern Geotechnology. *Izvestiya*

5. Abramov B. I., Ivanov A. G., Shilenkov V. A., Kuzmin I. K., Shevyrev Yu. V. Electric drive of modern mining machines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 5 – 2, pp. 145 – 162. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_52_0_145.
6. Hristova T. Tracking of the battery materials of electric vehicles in the mining industry via a blockchain. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science.* 2022, vol. 970, no. 1, pp. 1–5. DOI: 10.1088/1755-1315/970/1/012012.
7. Nikitenko M. S., Kizilov S. A. Techno-technological platforms for creating robotic complexes for the development of powerful reservoir deposits. *Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources.* 2019, no. 5, pp. 257–263. [In Russ].
8. Grycan W. Electric Vehicles in Mining for the Aspect of Operational Safety. *PRZEGŁAD ELEKTROTECHNICZNY.* 2022, no. 98, pp. 110–113. DOI: 10.15199/48.2022.12.27.
9. Ertugrul N., Kani A. P., Davies M., Sbarbaro D., Moran L. Status of Mine Electrification and Future Potentials. *International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES).* 2020, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SGES51519.2020.00034.
10. Rodrigues R., Albuquerque V., Ferreira J. C., Dias M. S., Martins A. L. Mining Electric Vehicle Adoption of Users. *World Electr. Veh. J.* 2021, vol. 12 (4), no. 233, pp. 1–31. DOI: 10.3390/WEVJ12040233.
11. Latyshev R. N., Abramov E. Y., Tolstobrova L. I. Charging stations for electric cars using hybrid energy storage systems. *Journal of Physics Conference Series.* 2021, vol. 2061 (1), pp. 1–7. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012010.
12. Safin A. R., Ivshin I. V., Tsvetkov A. N., Petrov T. I., Bosenko V. R., Monakhov V. A. Development of the technology of mobile charging stations for electric vehicles. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021, vol. 23, no. 5, pp. 100–114. [In Russ]. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-5-3-100-114.
13. Konyukhov V. Y., Oparina T. A., Zagorodnii N. A., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Analysis of the Reliability of Modern Trolleybuses and Electric Buses. *Mathematics* 2023, 11, 3260. DOI: 10.3390/math11153260.
14. Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Valuev D. V., Qi M. Review Models and Methods for Determining and Predicting the Reliability of Technical Systems and Transport. *Mathematics* 2023, 11, 3317. DOI: 10.3390/math11153317.
15. Shin M., Kim H., Jang H. Building an interoperability test system for electric vehicle chargers based on ISO/IEC 15118 and IEC 61850 standards. *Applied Sciences.* 2016, vol. 6(6), pp. 1–15. DOI: 10.3390/app6060165.
16. Ososkov D. V., Lyakhomsky A. V. Modeling of operation of mining electric dump trucks. *Vestnik UGATU.* 2017, vol. 21, no. 3(77), pp. 72–78. [In Russ].
17. Li X. Y., Huang Z., Tian, J., Tian Y. State-of-charge estimation tolerant of battery aging based on a physics-based model and an adaptive cubature Kalman filter. *Energy.* 2021, vol. 220, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.energy.2021.119767.
18. Martyushev N. V., Maloziyomov B. V., Sorokova S. N., Efremenkov E. A., Qi M. Mathematical Modeling of the State of the Battery of Cargo Electric Vehicles. *Mathematics.* 2023, vol. 11, p. 536. <https://doi.org/10.3390/math11030536>.
19. Khalikov I. H., Kukartsev V. A., Kukartsev V. V., Tynchenko V. S., Tynchenko Y. A., Qi M. Review of Methods for Improving the Energy Efficiency of Electrified Ground

Transport by Optimizing Battery Consumption. *Energies*. 2023, vol. 16, p. 729. DOI: 10.3390/en16020729.

20. Shchurov N. I., Dedov S. I., Maloziomov B. V., Shtang A. A., Klyuev R. V., Andriashin S. N. Degradation of Lithium-Ion Batteries in an Electric Transport Complex. *Energies*. 2021, vol. 14, p. 8072. <https://doi.org/10.3390/en14238072>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Латышев Роман Николаевич¹ — ассистент, младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

Абрамов Евгений Юрьевич¹ — ассистент, младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5013-3288;

Чернов Алексей Александрович¹ — младший научный сотрудник научно-исследовательской части, e-mail: al-exxxe-y@mail.ru, ORCID ID: отсутствует;

Кравченко Даниил Павлович¹ — ассистент, e-mail: d.kravchenko.2015@stud.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1182-6815

¹ Новосибирский государственный технический университет.

Для контактов: *Латышев Р. Н.*, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Latyshev R. N.¹, Assistant, Junior Researcher of Research Unit, e-mail: latyshev @corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-3920-8728;

Abramov E.Yu.¹, Assistant, Junior Researcher of Research Unit, e-mail: e.abramov@corp.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-5013-3288;

Chernov A. A.¹, Junior Researcher of the Research Unit, e-mail: al-exxxe-y@mail.ru, ORCID ID: absent;

Kravchenko D. P.¹, assistant, e-mail: d.kravchenko.2015@stud.nstu.ru, ORCID ID: 0000-0002-1182-6815,

¹ Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, Russia.

Corresponding author: *Latyshev R. N.*, e-mail: latyshev@corp.nstu.ru.

Получена редакцией 18.04.2023; получена после рецензии 24.08.2023; принята к печати 10.10.2023.

Received by the editors 18.04.2023; received after the review 24.08.2023; accepted for printing 10.10.2023.

