Энергоблок ЭБВ ЭД4М на основе свинцовых гелевых аккумуляторов: технические новации и экономический эффект

А.С. Кайров,
генеральный директор ООО «Аккумулятор инноваций»

В.М. Ягнятинский,
к.т.н., технический эксперт ООО «Аккумулятор инноваций»

В.П. Егоров,
руководитель инжиниринговых проектов ООО «Аккумулятор инноваций»

Применяемые сегодня в электропоездах аккумуляторы несовершенны в силу трудозатратности их обслуживания и невысокого срока эксплуатации. Разработка энергетического блока вагонного (ЭБВ) ЭД4М на базе необслуживаемых гелевых аккумуляторных ячеек PzV с использованием инвертора позволила существенно сократить эксплуатационные расходы, при этом увеличив срок службы с 3 до 7 лет. Новое решение прошло испытания на электропоездах Куйбышевской железной дороги и теперь готовится к серийному производству.

Актуальность разработки

В настоящее время на электропоездах ЭД4М (АО «Демиховский машиностроительный завод») Куйбышевской железной дороги – филиала ОАО «РЖД» применяются аккумуляторные батареи 90KL55P никель-кадмиевой электрохимической системы производства ОАО «Завод автономных источников тока» (Саратов) и ЗАО «ВЗЩА» (Великие Луки). Они предназначены для работы в буферном режиме с первичными источниками электропитания и выполняют функции аварийного и резервного источника электроснабжения при нарушениях в работе или пропадании первичной электрической сети для аварийного электроснабжения. Однако эти аккумуляторные батареи (АКБ) имеют ряд существенных недостатков, к которым можно отнести:

- необходимость регулярного проведения работ по контролю состояния заряженности аккумуляторов;
- регулярный контроль уровня электролита и доливку дистиллированной воды, когда в процессе эксплуатации уровень электролита снижается ниже допустимой величины;
- длительное время заряда аккумуляторов, который должен проводиться при постоянной величине тока более 16 часов.

Кроме того, данные аккумуляторы нельзя назвать экологичными: использование токсичного кадмия в их составе может вызывать нежелательное воздействие на обслуживающий персонал. Поэтому они подлежат замене на бескадмиевые альтернативы. Так, в железнодорожной автоматике и телемеханике никель-кадмиевые аккумуляторы запрещены с 2013 года.

Для устранения перечисленных слабых мест в ООО «Аккумулятор инноваций» был разработан энергоблок с улучшенными характеристиками на основе аккумуляторной батареи, состоящей из свинцовых аккумуляторов с трубчатыми электродами исполнения PzV с загущенным (гелеобразным) электролитом в сочетании с двунаправленным импульсным преобразователем напряжения. Решение позволяет повысить долговечность энергоблока и его эксплуатационную надежность. Так, в течение всего срока службы не требуется проведение работ по контролю уровня и плотности электролита в аккумуляторах батареи. Эти потребительские качества обеспечивают экономическую эффективность эксплуатации системы электроснабжения подвижного состава и снижение трудоемкости работ по обслуживанию электрооборудования вагона. При этом аккуму-

ляторы PzV более экологичны по сравнению с аналогами, так как включают ячейки закрытого типа, не дающие постоянного выброса вредных веществ в течение всего срока эксплуатации.

Идея использовать аккумуляторные батареи PzV совместно с инвертором возникла по аналогии с устройством литий-ионных систем накопления энергии, примером стали технические решения нашего партнера – компании Tesvolt GmbH (Германия). В разработанной ею системе накопления энергии каждый батарейный модуль комплектуется платой Active Battery Optimizer – активной двунаправленной системой управления зарядом/разрядом ячеек и головным модулем BMS[1] для каждого батарейного «кабинета», представляющего собой металлический корпус – шкаф с разделительными лотками и установленными в нем литий-ионными аккумуляторными модулями, последовательно соединенными между собой для достижения внутреннего номинального напряжения от 48 В до 768 В и накопленной мощности от 4,8 кВтч до 76 кВтч. Это позволяет получить длительный жизненный цикл литий-ионных АКБ.

Поэтому было принято решение разработать инвертор, который будет не допускать глубокий разряд и перезаряд АКБ, защищать от критических режимов, тем самым значительно увеличивая срок службы. Инвертор построен на современной элементной базе, имеет микропроцессорный модуль с собственной программной оболочкой, позволяющей автономно подбирать напряжение и ток заряда/разряда с учетом термокомпенсирующих условий, остаточного заряда SOC и остаточного ресурса SOH. Дополнительно он укомплектован модулем онлайн-мониторинга, позволяющим в режиме реального времени отслеживать состояние АКБ и инвертора.

Технические характеристики

Энергоблок для электропоездов ЭД4М представляет собой автономное устройство, подключаемое к системе питания низковольтных цепей электрооборудования вагонов, которое состоит из батареи и двунаправленного импульсного преобразователя постоянного напряжения типа ВПН-1500-110/48 (далее — преобразователь) с контроллером заряда аккумуляторной батареи на микропроцессорном программном управлении. Он обеспечивает требования по накоплению и использованию энергии в противопожарном оборудовании, системе связи и управления электропоездом во время планового и аварийного простоя, а также работу пневматического привода для перевода токоприемника в рабочее положение после длительного простоя, допустимая непрерывная продолжительность которого определена по результатам эксплуатационных испытаний.

Аккумуляторная батарея состоит из 30 последовательно соединенных свинцовых аккумуляторов 2PzV-110 (необслуживаемых) производства ООО «АКОМ-Индастриал» с регулирующим клапаном номинальной емкостью 110 А·ч, номинальным напряжением 60 В. Регулирующий клапан обеспечивает сброс избыточного давления внутри каждого аккумулятора в случае его перезаряда.

Преобразователь с контроллером заряда батареи на микропроцессорном программном управлении был разработан компанией-партнером ООО «РуТех». Он предназначен для согласования уровней напряжения применяемой батареи с гелеобразным электролитом с напряжением системы электроснабжения вагона и низковольтными потребителями вагона. Преобразователь обеспечивает защиту и оптимальный режим работы батареи: позволяет подавать в низковольтную электрическую сеть вагона рабочее напряжение 48 В и 110 В, контролировать мгновенную температуру внутри собственного корпуса и внутри аккумуляторной батареи, а также проводить мониторинг состояния батареи и сохранять полученную информацию на накопитель SD, размещенный в преобразователе напряжения.

[1] Battery Management System – система управления аккумуляторными батареями.

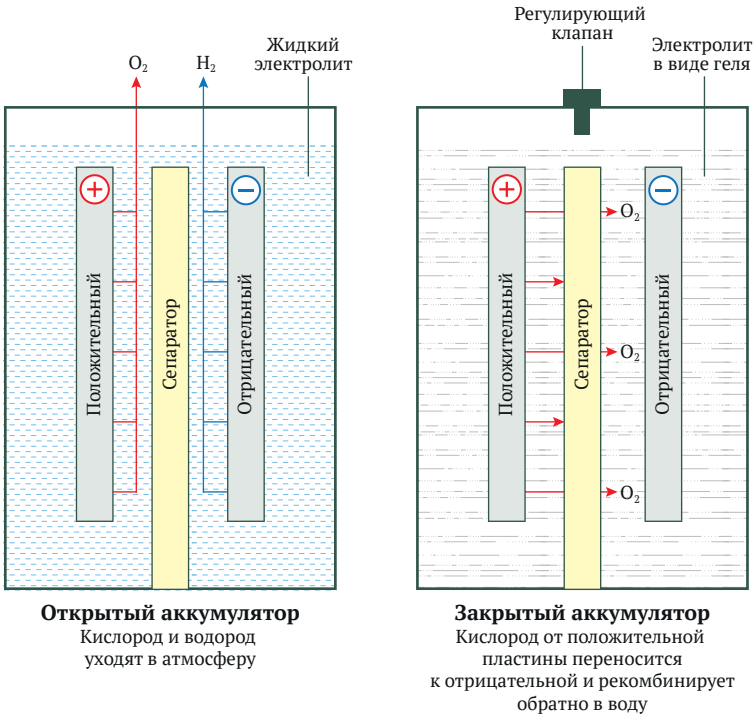

Рис. 1. Схематическое представление газовых потоков в открытом (с жидким электролитом) и закрытом (исполнение с регулирующим клапаном) аккумуляторах [1]

В процессе эксплуатации преобразователь обеспечивает выполнение следующих функций в системе электроснабжения вагона:

– заряд аккумуляторной батареи при постоянном напряжении путем преобразования постоянного напряжения от электрической сети вагона при наличии напряжения первичной сети в электрической сети вагона;
– разряд аккумуляторной батареи при пропадании напряжения первичной сети в электрической сети вагона. Переход от режима заряда в режим разряда и обратно производится автоматически;
– измерение напряжения, силы тока и температуры и сохранение результатов в условиях их непрерывности, регистрация и анализ данных в сравнении с заданными критериями, хранение и выдача отчетной информации.

Герметизированная батарея свинцово-кислотной системы позволила нам исключить потери электролита, сохраняя работоспособность аккумулятора на более длительный срок, чем у обычных с жидким электролитом открытого типа. Для создания такой батареи потребовалась организация процесса, при котором выделяющийся на положительном электроде кислород восстанавливается на отрицательном электроде (замкнутый кислородный цикл), а выделяющийся на отрицательном электроде водород окисляется на положительном электроде (замкнутый водородный цикл).

Стоит добавить, что практическая реализация кислородного и водородного циклов крайне сложна. Первая задача при герметизации состоит в оптимизации условий протекания кислородного цикла. Эта задача была решена за счет формирования в межэлектродных зазорах газовых каналов, через которые кислород перемещается к отрицательному электроду по механизму газовой диффузии, скорость которой в 107 раз выше скорости молекулярной диффузии в жидкости. В процессе заряда положительные электроды заряжаются раньше, чем отрицательные, и выделение кислорода на положительном электроде начинается до начала выделения водорода на отрицательном электроде. Для того чтобы направить выделяющийся кислород к отрицательному элек-

Табл. 1. Технические параметры энергоблока ЭБВ ЭД4М

Параметр	Значение
Номинальное выходное напряжение 1-го канала, В	110±10
Номинальное выходное напряжение 2-го канала, В	48±2
Максимальный выходной ток 1-го канала, А	16
Максимальный выходной ток 2-го канала, А	4
Максимальное зарядное напряжение АКБ при температуре окружающей среды от +10 до +40 °С, В	68±0,7
Максимальный зарядный ток, А	30
Энергия, запасаемая в энергоблоке (накопителе), кВт·ч	6,6
Срок службы в эксплуатации не менее, лет	7

троду, необходимо создать препятствие для его свободного выхода на поверхность блока и направить его через газовые каналы в межэлектродном зазоре, как показано на рисунке 1.

Для формирования газовых каналов применяют электролит, который связан в виде тиксотропного геля (желе). Кислород, который выделяется на положительном электроде, по мере частичного осушения геля в процессе работы аккумулятора образует в объеме геля газовые каналы, обеспечивающие его транспорт к поверхности отрицательного электрода по механизму диффузии. Попадая на отрицательный электрод, кислород вступает в химическую реакцию с его активной массой. Этот процесс называют замкнутым кислородным циклом [2].

Учитывая необходимость длительной работы (а в ТЗ на разработку энергоблока ЭБВ ЭД4М было заявлено 7 лет) аккумуляторной батареи в составе энергоблока, в конструкции применили трубчатые положительные электроды. Также в конструкции энергоблока предусмотрена защита от коротких замыканий, от превышения тока и напряжений. В таблице 1 указаны достигнутые технические параметры [3,4].

Эксплуатационные испытания

По итогам разработки прототипа энергоблока ЭБВ ЭД4М были получены положительные заключения от АО «ВНИИЖТ», ФГБНУ «Дирекция НТП» и Куйбышевской железной дороги о целесообразности проведения испытаний инновационного проекта на инфраструктуре ОАО «РЖД». Для проведения предварительных испытаний были изготовлены два опытных образца ЭБВ ЭД4М.

Опытный образец прошел испытания на стенде по утвержденным методикам, показав полное соответствие требованиям технического задания. С 20 августа 2020 года прототипы были установлены на два вагона электропоезда ЭД4М №0204 для проведения эксплуатационных испытаний. На рисунке 2 показано размещение энергоблока в подвагонном ящике ЭД4М.

Во время эксплуатационных испытаний был организован непрерывный онлайн-мониторинг энергоблоков с регистрацией его текущего состояния и записью истории изменения основных параметров работы в цепи аккумуляторной батареи (напряжение батареи, токи заряда и разряда, температура преобразователя и батареи), а также в линиях 1 и 2 системы электроснабжения вагонов. На рисунке 3 приведен пример зафиксированного преобразователем на накопителе SD графика изменения напряжения и тока прицепного вагона электропоезда ЭД4М за 23 октября 2020 года.

Результаты показывают, что энергоблок типа ЭБВ безотказно проходит скачки на-

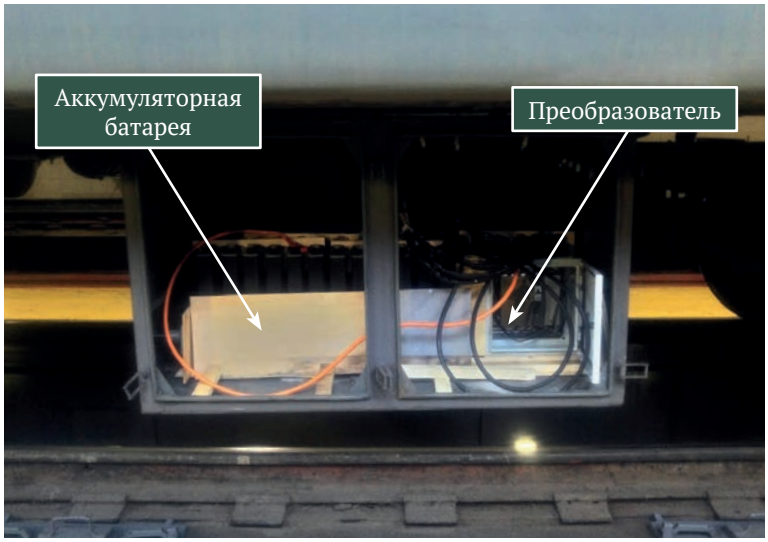

Рис. 2. Общий вид энергоблока ЭБВ ЭД4М в подвагонном ящике электропоезда

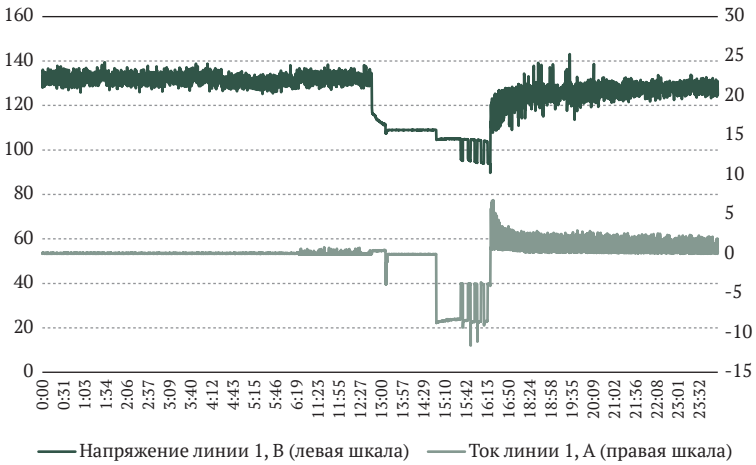

Рис. 3. Изменение напряжения и тока в линии 1 прицепного вагона электропоезда ЭД4М в течение 23 октября 2020 года

пряжения более 170 В в основной линии 1 и работает в условиях температуры ниже -32 °С (рис. 4).

Проведенный анализ работы энергоблока за период с 24 августа 2020 по 30 апреля 2021 года позволяет сделать следующие заключения:

1. При эксплуатационных испытаниях энергоблок обеспечивает гарантированным питанием в температурных условиях от -31,9 ºС до +29,9 ºС.
2. Зафиксированных отказов системы – 0, электропоезд ЭД4М №0204 не нарушил график выхода в рейс.
3. В подкритических ситуациях связка из двух прототипов энергоблока полностью замещает в составе электропоезда две дополнительно установленные и подключенные в общую сеть штатные батареи 90KL-55P, требующие плановую замену по выработанному ресурсу. Зафиксировано более 30 случаев превышения

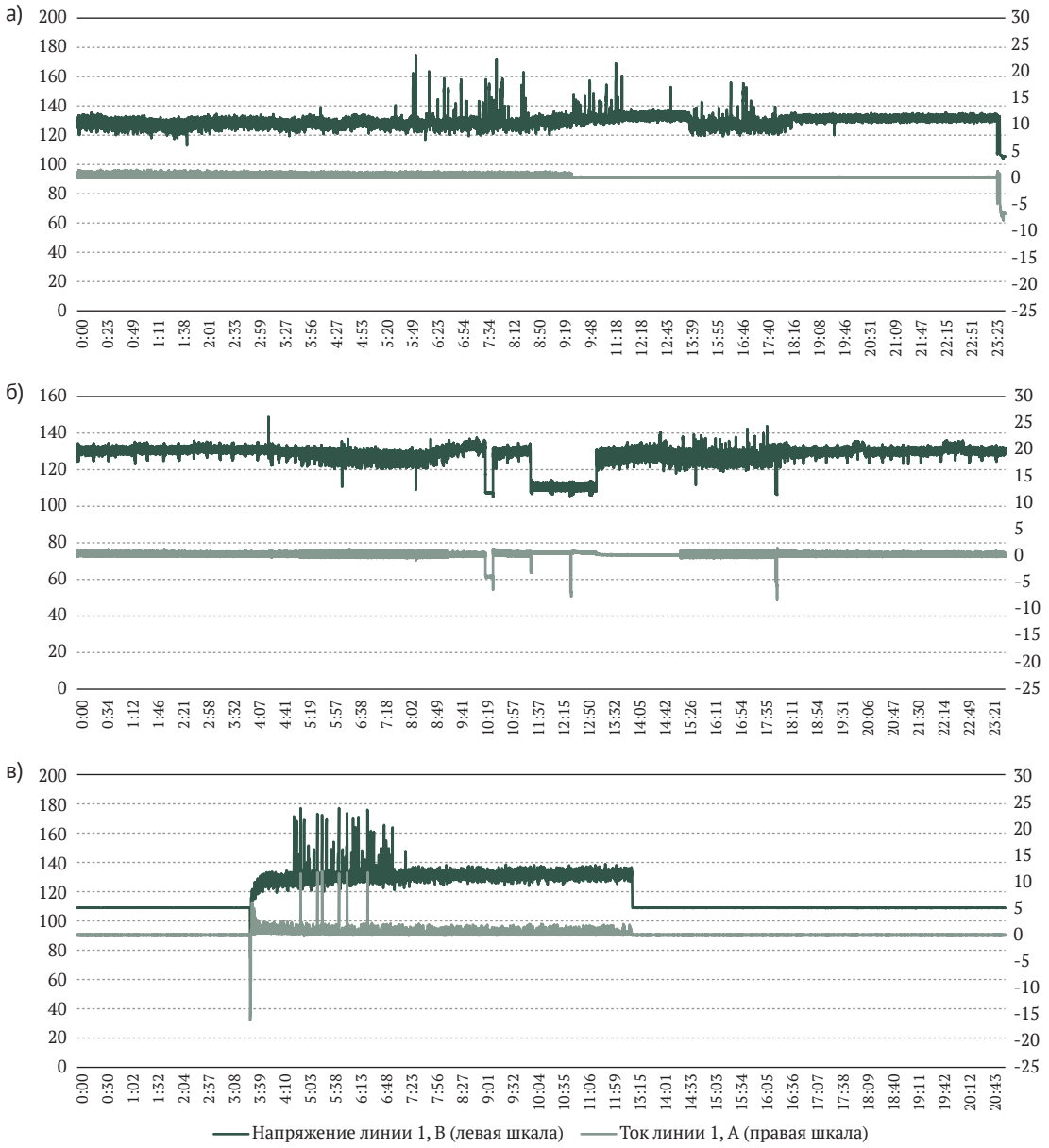

Рис. 4. Графики анализа работы энергоблока ЭБВ ЭД4М в составе электропоезда ЭД4М №0204:
а) при скачках напряжения до 176,9 В и температуре окружающей среды -20,6°С, головной вагон 1, 20.12.2020; б) при температуре внутри аккумуляторного ящика -32,9 °С, головной вагон 1, 17.02.2021; в) при скачках напряжения до 179 В и температуре окружающей среды +29,2 °С, прицепной вагон, 26.08.2020

штатных нагрузок в электросети поезда (U^{max} = 120 В, $U^{факт}$ = до 176,9 В).

4. Благодаря системе онлайн-мониторинга энергоблока не допускаются внештатные ситуации в обеспечении гарантированным электропитанием, обеспечивается диспетчеризация локомотивных бригад – зафиксировано 10 случаев.
5. За 8 месяцев эксплуатации ЭБВ ЭД4М на Куйбышевской железной дороге не зафиксировано снижение его ресурсных показателей (напряжение разомкнутой цепи, скорость разряда и приема заряда и т.д.), что предварительно подтверждает заявленный срок службы энергоблока 7 лет.

Экономический эффект

В отличие от никель-кадмиевых аккумуляторных батарей энергоблок не нуждается в обслуживании в течение всего срока эксплуатации (приготовление, заливка, доливка электролита, подзаряд), и, как следствие, нет необходимости в зарядном участке и специализированном персонале в железнодорожном депо. Как было доказано во время опытной эксплуатации, разработка исключает проведение зарядно-разрядных циклов после длительных перерывов в эксплуатации со снятием с вагона, что также позволяет свести эксплуатационные и подготовительные затраты к нулю.

Важно отметить, что при росте количества потребителей в системе электроснабжения, к примеру, при добавлении новых вагонов производства АО «ДМЗ», энергоблок имеет возможность опционального увеличения емкости аккумуляторной батареи и перенастройки преобразователя под более высокие мощности.

При том, что срок службы энергоблока был увеличен в 2,5 раза по сравнению с аналогами, решение получилось недорогим, позволяющим конкурировать по стоимости со штатными аккумуляторами без инверторов. Так, по расчетам разработчиков, срок окупаемости перехода с используемых сегодня 90KL55P на ЭБВ ЭД4М для Куйбышевской железной дороги составит 3 года при потребности парка в 67 энергоблоков. Экономия от использования одного энергоблока – порядка 21 тыс. руб. за 1 год, в то время как переоснащение всех 67 электровагонов позволит сэкономить около 10 млн руб. за 7-летний срок службы.

Сейчас идет доработка прототипов с учетом замечаний Куйбышевской железной дороги, поставка энергоблоков для всего действующего парка электровагонов должна быть выполнена до конца 2023 года. Начало серийного производства ЭБВ ЭД4М намечено на октябрь этого года. По результатам проекта была подана заявка в Роспатент для получения патента на изобретение. Потенциально техническое решение, опробованное на электропоездах ЭД4М, можно применить на других моделях моторвагонного подвижного состава.

Список использованной литературы:

1. Курзуков Н.И., Ягнятинский В.М. Стартерные аккумуляторные батареи. НИККЕЛЬ, 2011 г.
2. Павлов Д. Свинцово-кислотные аккумуляторы: Теория и технология: перевод с английского. ООО «Радугапринт». М., 2019. 746 с.
3. Кайров А.С., Егоров В.П. ТУ 27.90.70-001-05717004-2020 Энергоблок ЭБВ ЭД4М. Технические условия. Проект. ООО «Аккумулятор инноваций». Тольятти, 2020. 21 с.
4. Кайров А.С., Егоров В.П. Энергоблок ЭБВ ЭД4М для электроснабжения вагонов электропоездов ЭД4М. Инструкция по эксплуатации. ООО «Аккумулятор инноваций». Тольятти, 2020. 18 с.
5. Кайров А.С. и др. Заключительный отчет о выполненных работах по инновационному проекту по теме «Разработка энергоблока (накопителя электрической энергии) для электроснабжения вагонов электропоездов ЭД4М типа ЭБВ ЭД4М». ООО «Аккумулятор инноваций». Тольятти, 2021. 384 с.