

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДИСТАНЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ АККУМУЛЯТОРНОЙ БАТАРЕИ

канд. техн. наук, доц. А.С. ГУРСКИЙ

(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Рассмотрены аппаратные и программные способы повышения точности получения результатов дистанционной диагностики (ДД) аккумуляторов ВНЭЭ ЭАТС. Это в перспективе повысит качество технической эксплуатации путем оперативного выявления проблемных ячеек, планирования выполнения текущего ремонта, корректирования нормативов технического обслуживания, а также прогнозирования состояния ВНЭЭ для приближения ее к идеальному ресурсу. Основное направление – это получение данных без искажений от воздействия электромагнитных помех на борту ЭАТС. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании применяемых систем, а также при конструировании новых. Результаты дистанционной диагностики отдельных ячеек и ВНЭЭ в целом могут быть использованы для корректирования режимов работы на маршруте и выбору маршрутов по фактическому состоянию для отработки максимально-возможного количества циклов заряд-разряд, повышения культуры водителей, а в перспективе стать основой для применения в беспилотном управлении.

Работа включает анализ алгоритмов чтения данных, способам контроля достоверности параметров в пакете данных для исключения погрешности при выполнении расчетов как на борту ЭАТС, так и на удаленной системе контроля.

Ключевые слова: высоковольтный накопитель электрической энергии, ячейка, параметры, шины данных, дистанционная диагностика, контрольная сумма.

Введение. В Республике Беларусь огромное значение придается электрическому транспорту, особенно в крупных населенных пунктах, для обеспечения экологической безопасности. На улицах городов можно видеть разнообразные электрические автотранспортные средства (ЭАТС) как личного, так и общественного пользования [1]. Особый интерес представляют электробусы и троллейбусы с автономным ходом. Они обладают замечательными эксплуатационными свойствами, однако на данном этапе развития имеют уязвимый компонент, от которого зависит надежность всего ЭАТС, – это высоковольтный накопитель электрической энергии (ВНЭЭ). ВНЭЭ широко применяются как на мобильных, так и на стационарных устройствах для хранения электрической энергии. В мобильных устройствах, например, ЭАТС, критически важным является удельная энергоемкость по массе¹:

$$W_m = \frac{E}{m}, \text{ кВтч/кг}, \quad (1)$$

где E – энергоемкость, кВтч; m – масса накопителя (ячейки).

ВНЭЭ электротранспортных средств требуется заменить, когда остаточная емкость снижается до 70–80% от первоначальной, т.к. они больше не могут обеспечивать нужный запас хода [2]. Предлагается вторичное использование ВНЭЭ в стационарных устройствах в рамках концепции «Second Life» [2]. Батареи «Second Life» обходятся на 30–50% дешевле новых стационарных накопителей [3]. В низконагруженных режимах по величине силы тока и стабильной температуре батарея предсказуемо и безопасно сможет работать до достижения 60% от номинальной емкости².

Предлагаемая работа позволяет поднять точность получения результатов дистанционной диагностики аккумуляторов ВНЭЭ ЭАТС, что в перспективе повысит качество технической эксплуатации путем оперативного выявления проблемных аккумуляторов, планирования выполнения текущего ремонта, корректирования нормативов технического обслуживания, а также прогнозирования состояния ВАКБ для приближения ее ресурса к идеальному [4; 5].

Ранее, при исследованиях с высоковольтными накопителями, применяли простейшую систему считывания данных преобразователем COM – USB. Чтение данных выполнялось в соответствии с разработанным алгоритмом [6]. Цель настоящей работы – анализ причин возникновения помех в цепях ВНЭЭ и путей их снижения для повышения точности и достоверности данных на этапе получения.

¹ ГОСТ Р 58092.1-2018 (МЭК 62933-1:2016). Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ). Часть 1. Терминология. – Введ. 12.04.18. – М.: Стандартинформ, 2018. – 19 с.

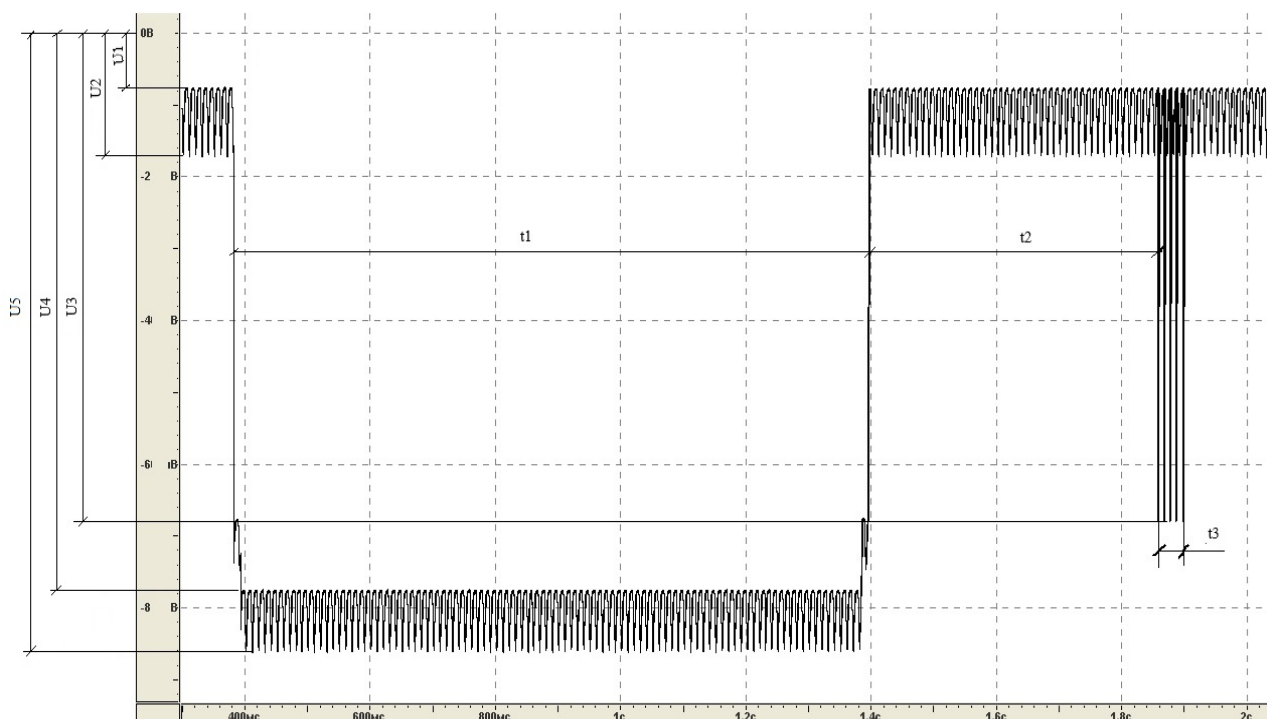
² ISO 12405-4:2018. Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 4: Performance testing. – Geneva: International Organization for Standardization, 2018. – 59 p.

Основная часть. В предыдущей работе был рассмотрен и применен протокол обмена данными RS-232, использующий стандарт физического уровня для асинхронной последовательной передачи данных между двумя устройствами, по причине своей простоты позволяющий работать с классическим COM – портом [7]. Фрагмент потока данных, считанных с информационной шины ЭАТС таким образом, приведен на рисунке 1.

```
09:58:38.658 -> 170 85 160 46 100 89 179 10
09:58:38.658 -> 170 85 160 47 100 88 179 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 48 96 91 171 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 49 101 91 175 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 50 101 91 172 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 51 100 91 172 10
09:58:38.705 -> 170 85 160 52 101 92 173 10
```

Рисунок 1. – Фрагмент потока данных информационной шины

Недостатком реализации активной балансировки, применяемой ВНЭЭ МА3-203Т70, является передача управляющего сигнала на балансировку в общую шину цифровых данных. Данный сигнал включается на определенное время с длительностью, пропорциональной дисбалансу ячеек, в соответствии с осциллограммой, представленной на рисунке 2.



U1 – наименьшее значение напряжения уровня рецессивного состояния шины данных, В; U2 – наибольшее значение напряжения уровня рецессивного состояния шины данных, В; U3 – амплитуда колебаний цифрового информационного сигнала в доминантном состоянии, В; U4 – наименьшее значение сигнала включения активной балансировки, В; U5 – наибольшее значение сигнала включения активной балансировки, В; t1 – длительность включения активной балансировки, с; t2 – длительность паузы между отключением активной балансировки и цифровым информационным сигналом, с; t3 – длительность информационного сигнала, с.

В примере: U1 = -0,8 В; U2 = -1,7 В; U3 = -6,8 В; U4 = -7,7 В; U5 = -8,6В; t1 = 1,02 с; t2 = 0,46 с; t3 = 0,02 с

Рисунок 2. – Осциллограмма сигнала в шине данных в режиме активации системы балансировки высоковольтного накопителя электрической энергии

Даже без выполнения расчетов из осциллограммы видно, что амплитуда U5 и длительность t1 сигнала включения балансировки в цифровой шине больше максимального размаха цифрового информационного сигнала U3 с длительностью t3. Одновременно с этим наблюдается отсутствие четких уровней сигналов в шине данных за счет появления электромагнитных помех. Определим амплитуды помех и их влияние в абсолютном и относительном виде на информационный сигнал. Все отрицательные значения на графике связаны с тем, что в штатном режиме передача осуществляется по отношению к положительному сигнальному проводу.

Амплитуда уровня помехи напряжения рецессивного состояния шины данных $\Delta U_{п1}$ определяется по формуле

$$\begin{aligned}\Delta U_{п1} &= U2 - U1, \text{ В.} \\ \Delta U_{п1} &= -1,7 - (-0,8) = -0,9 \text{ В.}\end{aligned}\quad (2)$$

Действующее значение уровня напряжения рецессивного состояния шины данных U_d определяется как

$$U_d = U1 + \frac{\Delta U_{п1}}{2}, \text{ В.} \quad (3)$$

Действующее значение уровня напряжения рецессивного состояния шины данных:

$$U_d = -0,8 + (-0,9) = -1,7 \text{ В.}$$

Относительно уровня действующего напряжения определяются значения других уровней напряжений.

Подобным образом проводится расчет амплитуды уровня помех сигнала включения активной балансировки ΔU_b :

$$\begin{aligned}\Delta U_b &= U5 - U4, \text{ В.} \\ \Delta U_b &= -8,6 - (-7,7) = -0,9 \text{ В.}\end{aligned}\quad (2)$$

Как видно по результатам расчета, электромагнитная помеха при включенном режиме активной балансировки такая же, как и в рецессивном режиме. Действующее значения сигнала включения активной балансировки определяется следующим образом:

$$\begin{aligned}U_{db} &= U4 + \frac{\Delta U_b}{2}, \text{ В.} \\ U_{db} &= -7,7 + \frac{-0,9}{2} = -8,15 \text{ В.}\end{aligned}\quad (3)$$

Определяется напряжение включенного состояния активной балансировки:

$$\begin{aligned}U_b &= U_{db} - U_d, \text{ В.} \\ U_b &= -8,15 - (-1,7) = -6,45 \text{ В.}\end{aligned}\quad (2)$$

Амплитуда цифрового информационного сигнала в шине данных:

$$\begin{aligned}\Delta U_i &= U3 - U_d, \text{ В.} \\ \Delta U_i &= -6,8 - (-1,7) = -5,1 \text{ В.}\end{aligned}\quad (3)$$

Из приведенного расчета видно, что U_b больше ΔU_i . Это подтверждает, что напряжение включенного состояния активной балансировки больше амплитуды цифрового информационного сигнала в шине данных, и доказывает факт наличия помехи приему полезных данных из шины в указанном транспортном средстве. Данный эффект наблюдается в большей мере в режиме рекуперации и заряда. Верхние и нижние уровни действующего напряжения также имеют достаточно высокие размахи колебаний, составляющие 0,9 В. Уровень помехи δ в относительном выражении составит:

$$\begin{aligned}\delta &= \frac{\Delta U_{п1}}{\Delta U_i} * 100, \% \\ \delta &= \frac{-0,9}{-5,1} * 100 = 17,6 \%\end{aligned}\quad (4)$$

Полученное значение в относительном виде показывает, что уровень помех большой, и следует принимать меры по обеспечению качества передачи информации.

В результате при передаче такого сигнала входные буферы микропроцессоров переполняются, и зачастую происходит обработка данного сигнала, что значительно замедляет обработку полезной информации и выдача сформированного сигнала происходит с отставанием от реального времени.

Выбор способа проверки целостности передаваемых данных. Рассмотрим пример одного сообщения из пакета сообщений, полученного из шины данных ВНЭЭ исследуемого ЭАТС в момент времени, указанного вначале:

09:58:38.705 -> 170 85 160 51 100 91 172 10

Перед проверкой целостности данных необходимо определить, какой именно алгоритм заложен в систему обмена данными. В протоколах обмена данными в системе управления батареей (BMS – Battery Management System) через последовательный порт RS485 число 10 в качестве конечного байта означает символ перевода строки LF (Line Feed) [9].

Рассмотрим три самых распространенных метода определения контрольной суммы и подберем наиболее приемлемый.

Метод аддитивной контрольной суммы представляет простую сумму всех байтов или сложение по модулю. Этот вариант часто используется в простых протоколах, где контрольная сумма – просто остаток от деления суммы всех байтов на 256. Проведем проверку данного предположения для приведенного примера. Результатом деления на 256 должно стать число 172. Выполним пошаговое сложение в соответствии с таблицей 1 и сравним полученные суммы с предполагаемым результатом на каждом шаге.

Таблица 1. – Результаты пошагового сложения методом аддитивной контрольной суммы

Шаг	Операция	Промежуточный результат в десятичном виде (Dec)	Промежуточный результат в шестнадцатеричном виде (Hex)
1 (сложение двух первых значений)	170 + 85	255	0xFF
2 (сложение со следующим значением)	255 + 160	415	0x019F
3 (сложение со следующим значением)	415 + 51	466	0x01D2
4 (сложение со следующим значением)	466 + 100	566	0x0236
5 (получение абсолютной суммы)	566 + 91	657	0x0291
6 (остаток после выделения целых)	657 – (256*2)	145	0x0091
7 (инверсивное значение)	256 – 145	111	0x006F

Если используется классический алгоритм Checksum, то контрольная сумма обычно занимает 1 байт, старший разряд отбрасывается. В нашем случае выделяется полное число байтов, здесь оно составляет 2. В результате остается 145 (0x91). В некоторых случаях в качестве контрольной суммы может быть применено инвертирование значения или дополнение до нуля, где сумма всех байтов вместе с контрольной суммой должна быть кратна 256 (0xFF). Обратите внимание, что сложение двух первых байтов дает число 256 (0xFF), что практически не влияет на результат расчета контрольной суммы. После проведения исключения старших разрядов остаток – число 111 (0x6F). Как видно из результатов, ни одно из значений не соответствует указанному значению в примере. Следовательно, данный метод не подходит для расчета контрольной суммы применяемого устройства.

Метод продольной избыточной проверки LRC (Longitudinal Redundancy Check). Продольная избыточная проверка известна как двумерная проверка четности. В этом методе данные, которые необходимо отправить, организуются в таблицы строк и столбцов. Блок битов делится на таблицу или матрицу строк и столбцов. Для обнаружения ошибки ко всему блоку добавляется избыточный бит, и блок передается приемнику. Приемник использует эту избыточную строку для обнаружения ошибки. После проверки данных на ошибки приемник принимает данные и отбрасывает избыточную строку битов.

Одной из разновидностей метода LRC является вертикальный контроль четности VRC (Vertical Redundancy Check), т.к. он дополняет контроль четности отдельных символов, создавая двухмерную схему обнаружения ошибок. Алгоритм контроля целостности данных, применяемый в методе продольной избыточной проверки, может быть применен в упрощенном виде как метод «побитовое исключающее ИЛИ» или XOR (eXclusive OR).

Метод «побитовое исключающее ИЛИ» имеет высокую популярность, т.к. относительно легко реализуется аппаратными устройствами. Следует отметить, что при данном методе необходимо учитывать, что в 90% инженерных протоколов стартовые маркеры (в нашем случае это AA 55) исключаются из расчета контрольной суммы. Это классическое правило построения промышленных протоколов: служебные байты начала пакета не участвуют в расчете помехоустойчивого кода – они всегда одинаковы. Контрольная сумма считается только для «полезных данных», которые идут следом (начиная с байта 160 (0x A0) и далее). Но если учесть эти данные, используя операцию «исключающее ИЛИ», заметим, что результатом является число 256 (0xFF), как и в случае с расчетом аддитивной контрольной суммы. Это не изменяет промежуточный результат, однако может привести к инверсии окончательного. Переведем байты в двоичный вид и применим «побитовое исключающее ИЛИ» последовательно:

AA = 10101010

55 = 01010101

Результат: AA XOR 55 = 11111111 (0XFF)

Проведем расчет контрольной суммы методом «побитовое исключающее ИЛИ». Перед выполнением расчетов исключаются стартовые маркеры и используются только полезные байты: 160, 51, 100, 91. К этим числам последовательно применяется операция «побитовое исключающее ИЛИ». Результаты расчетов методом «побитовое исключающее ИЛИ» приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы 2, результат совпал с предпоследним значением, что указывает на правильность примененного метода. Использование контрольной суммы при построении базы данных по результатам считывания позволит с высокой точностью проводить дальнейшие расчеты, что в свою очередь снизит вероятность ошибки при расчете остаточной емкости и прогнозировании работоспособности высоковольтных накопителей энергии.

Таблица 2. – Результаты расчета методом «побитовое исключающее ИЛИ»

Шаг	Операция (XOR)	Промежуточный результат	
		в десятичном виде (Dec)	в двоичном виде (Bin)
1	1010 0000 0011 0011	147	1001 0011
2	1001 0011 0110 0100	247	1111 0111
3	1111 0111 0110 0100	172	1010 1100

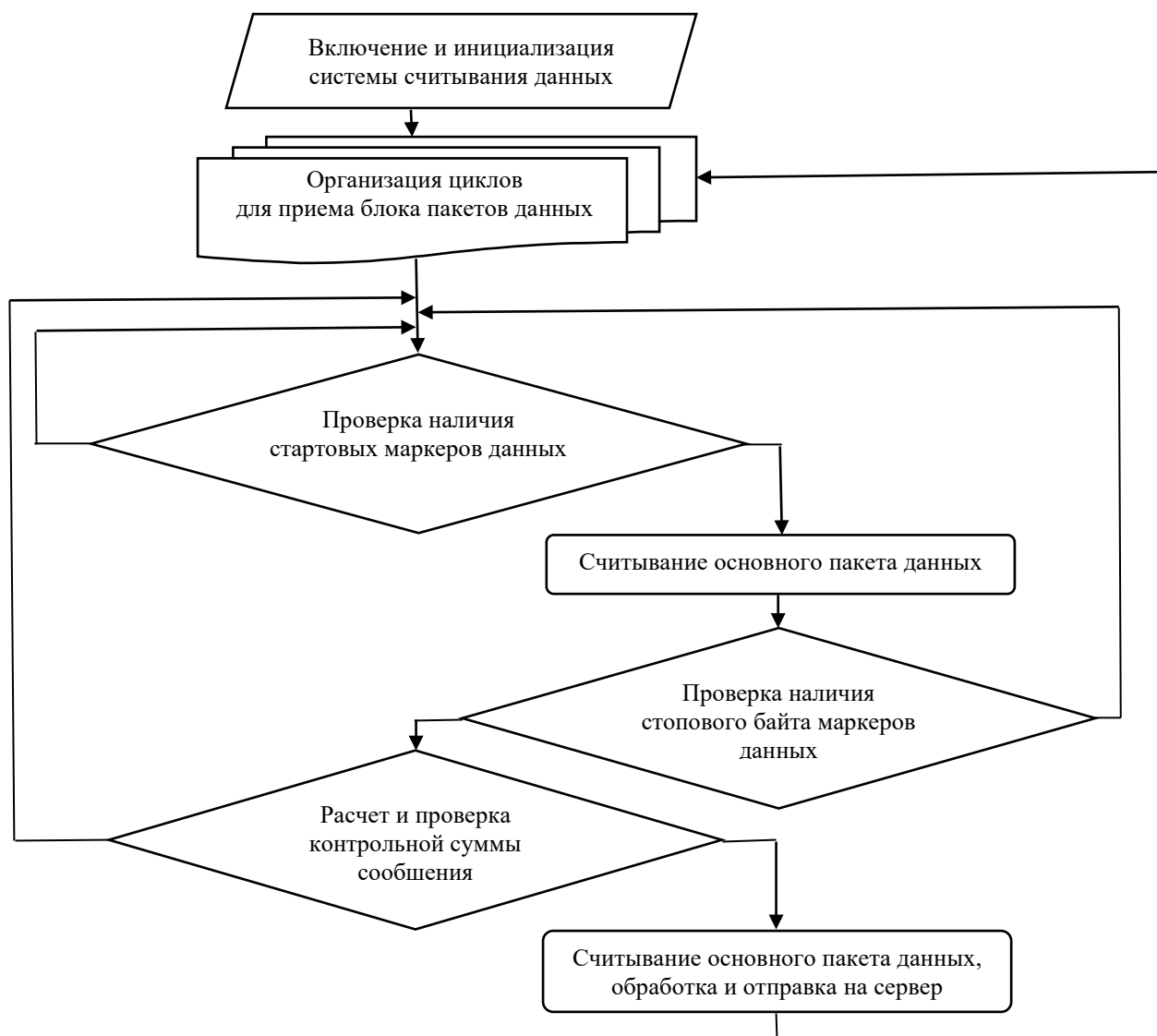


Рисунок 3. – Алгоритм считывания данных с использованием проверки контрольной суммы

Построение алгоритма считывания данных с использованием проверки контрольной суммы производится в соответствии с блок-схемой (см. рисунок 3). Изменение в программном обеспечении с использованием алгоритма позволит полностью исключить ошибки получаемой информации.

Анализ аппаратной части. После проведения испытаний с ВНЭЭ ЭАТС было установлено, что применяется однопроводная система передачи данных между отдельными ведомыми платами BMS и ведущей платой вместо двухпроводной с использованием стандарта Modbus RTU, который предназначен преимущественно для двухпроводной типа RS-485.

Особенностью топологической схемы на опытном троллейбусе является деление 160 ячеек на 4 модуля, в каждом из которых имеется 40 ячеек (аккумуляторов). На каждом аккумуляторе установлена ведомая Slave-плата, которая контролирует напряжение, температуру и степень заряда и отправляет информацию о состоянии в контроллер. Все платы соединяются параллельно в общую шину Modbus. Эта же плата может автоматически присваивать себе динамический идентификационный номер (ID). Механизм автоназначения идентификационных номеров может быть причиной неправильной идентификации в режиме эксплуатации, что в свою очередь приводит к повышению времени выявления дефектных ячеек. Принудительное присвоение идентификатора каждому модулю перед сборкой решает данную проблему, однако это увеличивает объем работ при сборке на этапе изготовления и при замене отдельных ячеек на этапе эксплуатации. Такой способ позволяет безошибочно выявлять неисправные аккумуляторы в процессе эксплуатации, а также вести учет состояния каждого аккумулятора на протяжении всего жизненного цикла, что особенно актуально для включения в систему «Умный автопарк» и вторичного использования в стационарных накопителях.

Гальваническая развязка. 160 ячеек в последовательном соединении дают напряжение в диапазоне от 432 В до 640 В [8]. Если использовать однопроводную схему без изоляции, то потенциал 160-й ячейки относительно 1-й мгновенно выведет контроллер из строя. Проще и дешевле развязать гальванически, изолировать одну линию связи, чем дифференциальную пару типа RS-485. Если делать на Modbus, то следует применять RS-485 или CAN вместо однопроводной схемы. Разница в один провод невелика, но дифференциальный сигнал RS-485 гораздо устойчивее к помехам, которые неизбежны в системе на 160 ячеек, особенно в экстремальных условиях.

Для исключения влияния требуется изменения режима балансировки путем изменения программного обеспечения ЭАТС. Другим способом следует исключить из работы аккумуляторы, имеющие сниженную емкость и повышенное внутреннее сопротивление. Достоверная информация по каждой ячейке позволяет спрогнозировать реальную емкость, что в свою очередь позволяет переупаковывать модули с одинаковыми параметрами. После выработки 20% ресурса требуется замена на новые ячейки [10]. А ячейки остаточными параметрами ниже 80% остаточной емкости использовать в стационарных системах накопления энергии.

Заключение. Таким образом, применение дистанционной диагностики ВНЭЭ позволяет оперативно предупреждать возникновение нештатных ситуаций с отключением систем автономного хода, выполнять своевременные техническое обслуживание и ремонт накопителей для сохранения в рабочем диапазоне, прогнозировать изменение ресурса в процессе эксплуатации, планировать выполнение капитального ремонта накопителей с использованием дефектовки и селективного группирования по фактическим параметрам работы отдельных ячеек, перевод накопителей или отдельных модулей в щадящие условия стационарных накопителей при достижении критических значений при эксплуатации в активном режиме с сохранением истории на протяжении всего жизненного цикла.

Разработанный алгоритм считывания данных с использованием проверки контрольной суммы позволяет не только достоверно получать данные, но и выявлять нарушения в работе шины данных и может быть применен при диагностировании и ремонте шины передачи данных.

По результатам выполненной работы разработаны предложения по изменению конструкции системы обмена информации со снижением помех при передаче данных, а также по изменению схемы управления активными балансирами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гурский А.С., Савич Е.Л., Капустин В.В. Автотранспортные средства с электродвигателем: учеб. пособие. – Минск: Выш. шк., 2023. – 256 с.: ил.
2. Bergqvist N., Talakoob B. Comparative Life Cycle Assessment of Second Life NMC Battery and New LFP Battery for BESS Applications: master's thesis / Chalmers University of Technology. – Gothenburg, 2022. – 118 p. – URL: <https://odr.chalmers.se/items/fd064b63-2e0d-49c2-bd0d-f556953eda46> (date of access: 15.07.2026).
3. Engel H., Hertzke P., Siccario G. Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage: Report / McKinsey & Company. – New York: McKinsey, 2019. – 28 p. – URL: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/second-life-ev-batteries-the-newest-value-pool-in-energy-storage> (date of access: 15.07.2026).
4. Гурский А.С. Система удаленного мониторинга и дистанционной диагностики высоковольтных накопителей электроэнергии электрических автотранспортных средств // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 5. – С. 109–115.

5. Гурский А.С. Способы учета условий эксплуатации электрических автотранспортных средств при определении корректирующих коэффициентов периодичности и трудоемкости технического обслуживания и текущего ремонта // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2024. – Вып. 6. – С. 80–88.
6. Гурский А.С. Совершенствование дистанционной диагностики ячеек высоковольтной аккумуляторной батареи // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2024. – № 1(49). – С. 79–88. DOI: 10.52928/2070-1616-2024-49-1-79-88
7. Гурский А.С., Седяко П.В. Анализ шины K-line, как первоисточника параметров для общего и поэлементного диагностирования = Analysis of the K-line bus as the primary source of parameters for general and element-by-element diagnostics // XI Форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сб. материалов / Минск (12–16 дек. 2022 г.) / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 133–136.
8. Гурский А.С., Савич Е.Л. Параметры компонентов высоковольтной сети электромобилей и их расчет // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В, Промышленность. Прикладные науки. – 2023. – № 2(48). – С. 50–59. DOI: 10.52928/2070-1616-2023-48-2-50-59
9. Гурский А.С., Седяко П.В. Реверс-инжиниринг протоколов обмена шин данных электронных блоков управления = Reverse engineering of exchange protocols data bus of electronic control units // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 4. – С. 36–44.
10. Гурский А.С. Система удаленного мониторинга и дистанционной диагностики высоковольтных накопителей электроэнергии электрических автотранспортных средств // Транспорт и транспортные системы: конструирование, эксплуатация, технологии: сб. науч. ст. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) и др. – Минск: БНТУ, 2023. – Вып. 5. – С. 109–115.

Поступила 22.07.2026

IMPROVING THE ACCURACY OF REMOTE DIAGNOSTICS OF A HIGH-VOLTAGE BATTERY

A. GURSKY

(Belarusian National Technical University, Minsk)

The article discusses hardware and software methods for increasing the accuracy of obtaining remote diagnostics (RD) results for high-voltage energy storage (HVES) batteries of electric vehicles (EV). This will ultimately improve the quality of technical operation by promptly identifying problematic cells, planning routine repairs, adjusting maintenance norm, and forecasting the condition of high-voltage energy storage devices to bring them closer to their ideal lifespan. The main focus is on obtaining data without distortion from the effects of electromagnetic interference on board the EV.

However, the obtained results can be used to improve the existing systems, as well as to design new ones. The results of remote diagnostics of individual cells and the entire high-voltage battery can be used to adjust operating modes along the route and select routes based on the actual condition to practice the maximum possible number of charge-discharge cycles, improving the culture of drivers, and, in the future, become the basis for application in unmanned control.

The work includes an analysis of data reading algorithms and methods for parameter reliability controlling a data packet to eliminate errors when performing calculations both on board the EATS and on a remote control system.

Keywords: high-voltage electric energy storage device, cell, parameters, data buses, remote diagnostics, checksum.