

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 629.4.026:629.423.32:621.355.9

DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-6>

# Унификация бортовых тяговых накопителей энергии для подвижного состава железных дорог



Михаил ЯРОСЛАВЦЕВ

**Михаил Викторович Ярославцев**

Некоммерческое акционерное общество «Торайгыров университет»  
(НАО «Торайгыров университет»), Павлодар, Республика Казахстан.  
ORCID 0000-0002-1440-2065; SCOPUS AuthorID; 56532450300,  
РИИЦ SPIN-код 3977-8959.

✉ [myaroslavtsev@yandex.ru](mailto:myaroslavtsev@yandex.ru).

## АННОТАЦИЯ

По мере снижения стоимости тяговых литиевых батарей создается большое количество образцов подвижного состава, использующих их для приема энергии рекуперации, выравнивания нагрузки на источник энергии, обеспечения автономного хода. В работе поставлена цель показать преимущества раздельного проектирования и производства бортовых тяговых накопителей и использующего их подвижного состава, что потребует стандартизации накопителей энергии, очертить круг требований, которые необходимо задать при разработке стандарта, и проиллюстрировать предложения, определив возможные требования к массогабаритным и энергетическим характеристикам унифицированного аккумуляторного накопителя. Для этого на основании обзора подходов к применению накопителей энергии и современных конструкций подвижного состава, на котором при-

меняются тяговые аккумуляторы, показаны основные сценарии их применения.

Выделены основные процессы преобразования энергии тяговым приводом локомотивов на различных временных интервалах и выполнена оценка параметров накопителей энергии для возможных сценариев их применения с использованием методов теории тяги.

На основании полученных результатов рассчитаны основные характеристики унифицированных модулей для накопления энергии. Проведен анализ ограничений, определяющих энергоемкость и мощность, массу, габариты и способ размещения накопителей, их номинальное напряжение. Указаны требования для проектирования стандартного механического, электрического и информационного интерфейса предложенных модулей.

**Ключевые слова:** железнодорожный транспорт, тяговой накопитель энергии, литий-ионный аккумулятор, стандартизация, взаимозаменяемость, энергосбережение.

*Для цитирования:* Ярославцев М. В. Унификация бортовых тяговых накопителей энергии для подвижного состава железных дорог // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 6 (109). С. 48–59. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-6-6>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

С начала 2020-х годов происходит бурное внедрение тяговых накопителей энергии (НЭ) на железнодорожном подвижном составе [1; 2]. Контактно-аккумуляторные электропоезда с дальностью хода до 100–200 км эксплуатируются в Великобритании, Германии, Дании, Японии и планируются к поставке в США, Латвию и другие страны<sup>1, 2, 3, 4</sup>. В 2021 году в США испытана первая накопительная секция емкостью 2,4 МВт·ч, предназначенная для работы по системе многих единиц вместе с магистральными тепловозами<sup>5</sup>. Компания EMD Joule предлагает аналогичные секции с накопителем энергоемкостью от 4 до 14,5 МВт·ч мощностью 1500–5700 кВт<sup>6</sup>, которые проходят испытания в США и Бразилии, а компания Wabtec – секции емкостью от 1,1 до 8,5 МВт·ч мощностью до 5000 кВт<sup>7</sup>. В КНР по заказу Таиланда построен аккумуляторный электровоз с дальностью хода до 200 км,<sup>8</sup> а по заказу Венгрии – магистральный электровоз с накопителем емкостью 0,2 МВт·ч для маневровых передвижений и контактнo-аккумуляторный маневровый локомотив емкостью 0,35 МВт·ч<sup>9</sup>. Разрабатывается ряд других

электровозов с возможностью движения на «последней миле» с питанием от аккумулятора<sup>10</sup>. В России за последние годы созданы гибридные и контактнo-аккумуляторные маневровые локомотивы серий ТЭМ35, ТЭМ5Х, ТЭМ9Н, ЭМКА2<sup>11</sup>.

Активное развитие новых типов локомотивов стало возможным благодаря совершенствованию аккумуляторов на основе лития, обладающих высокой удельной энергоемкостью при высокой удельной мощности, а также конденсаторов двойного электрического слоя (КДЭС). Их типичные параметры по данным [3] и по материалам производителей<sup>12</sup> приведены в табл. 1. Область применения тяговых литиевых батарей регулярно расширяется по мере снижения их цены. Так, по различным оценкам экспертного агентства Bloomberg, к 2030 году цена аккумуляторов снизится в 1,5–3 раза по сравнению с 2023<sup>13</sup>.

Технико-экономические расчеты, выполненные производителем Stadler в 2021 году, показали, что на неэлектрифицированных линиях применение аккумуляторных электропоездов может быть выгоднее, чем дизель-поездов даже без

<sup>1</sup> Stadler Flirt Akku. [Электронный ресурс]: <https://www.stadlerail.com/en/flirt-akku/details/>. Доступ 22.05.2023.

<sup>2</sup> Alstom presents its battery-powered multiple unit train in Saxony [Электронный ресурс]: [https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/09/07/20210907\\_PR\\_DACH\\_Saxony\\_BEMU\\_Demo\\_EN.pdf](https://www.alstom.com/sites/alstom.com/files/2021/09/07/20210907_PR_DACH_Saxony_BEMU_Demo_EN.pdf). Доступ 22.05.2023.

<sup>3</sup> 新たな「蓄電池電車」を男鹿線に導入します [На линии Ога появится новый аккумуляторный поезд] [Электронный ресурс]: <https://www.jreast.co.jp/akita/press/pdf/20151120-1.pdf>. Доступ 22.05.2023.

<sup>4</sup> Metro class 777 IPEMU. [Электронный ресурс]: [https://www.stadlerail.com/media/pdf/mmer\\_ipemu0922e.pdf](https://www.stadlerail.com/media/pdf/mmer_ipemu0922e.pdf). Доступ 22.05.2023.

<sup>5</sup> BNSF Battery Electric Locomotive Report. [Электронный ресурс]: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2022-11/zanzeff-bnsf-belreport.pdf>. Доступ 22.05.2023.

<sup>6</sup> EMD Joule battery-electric locomotive. [Электронный ресурс]: <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20220627-26f7e-6007b>. Доступ 22.05.2023.

<sup>7</sup> Battery electric locomotive technology FLXdrive. [Электронный ресурс]: <https://www.wabteccorp.com/FLXdrive-Battery-Electric-Locomotive?inline>. Доступ 22.05.2023.

<sup>8</sup> CRRC Dalian delivers battery locomotive to Thailand. [Электронный ресурс]: <https://www.railjournal.com/technology/crrc-dalian-delivers-battery-locomotive-to-thailand/>. Доступ 22.05.2023.

<sup>9</sup> CRRC Locomotives in Europe. [Электронный ресурс]: <https://crrczelc-europe.com/locomotives-in-europe/#nobrebro-custom-646cada43b9861>. Доступ 22.05.2023.

<sup>10</sup> Traction: Going the last mile. [Электронный ресурс]: <https://www.railwaygazette.com/in-depth/traction-going-the-last-mile/59444.article>. Доступ 22.05.2023. Traxx locomotive with zero-emission last mile operational in 2025. [Электронный ресурс]: <https://www.railtech.com/rolling-stock/2022/09/20/traxx-locomotive-with-zero-emission-last-mile-operational-in-2025/>. Доступ 22.05.2023.

<sup>11</sup> Селезнев И. Л., Шафрыгин А. В., Чекмарев А. Е., Хохряков В. А., Ванин И. В. Знакомьтесь: ТЭМ5Х – концепт нового гибридного локомотива // Локомотив. – 2019. – № 12. – С. 30–32. Кузнецов Л. В. Локомотивы «Синары» следуют курсом Экологической стратегии // Локомотив. – 2021. – № 11. – С. 2–3. Электровоз ЭМКА2. [Электронный ресурс]: <https://eec.eaeunion.org/comission/department/dotp/klimaticheskaya-povestka/bank/118091/>. Доступ 22.05.2023.

<sup>12</sup> Winston battery. [Электронный ресурс]: <http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery>. Доступ 22.05.2023. SCiB rechargeable battery – Toshiba. [Электронный ресурс]: <https://www.global.toshiba/ww/products-solutions/battery/scib/product/cell.html>. Доступ 22.05.2023. Ultracapacitor overview – Maxwell Technologies. [Электронный ресурс]: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/>. Доступ 22.05.2023.

<sup>13</sup> Goldie-Scot, L. A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices – Bloomberg NEF. [Электронный ресурс]: <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>. Доступ 22.05.2023. Bullard N. Even High Battery Prices Can't Chill the Hot Energy Storage Sector – Bloomberg NEF. [Электронный ресурс]: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-01-12/even-high-battery-prices-can-t-chill-the-hot-energy-storage-sector>. Доступ 22.05.2023.





Таблица 1

**Технико-экономические характеристики накопителей энергии  
[выполнено автором на основании данных [3]<sup>9, 12</sup>]**

Тип НЭ	LiFePO <sub>4</sub>	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	КДЭС
Удельная энергоёмкость, Вт·ч/кг	125	90	6
Удельная мощность разряда, Вт/кг	250–350	1800	не ограничена для тяговых накопителей
Удельная мощность заряда, Вт/кг	120	1800	
Плотность элементов, т/м <sup>3</sup>	1,6	2,0	1,0
Удельная стоимость, \$/кВт·ч	120–150	200–250	5000–10 000
Количество циклов заряда-разряда	3000	до 20 000	1·10 <sup>6</sup> –10·10 <sup>6</sup>

учета экономии энергии при рекуперативном торможении<sup>14</sup>.

В ближайшие годы можно ожидать разработку новых серий локомотивов, оборудованных тяговыми накопителями энергии (НЭ), для сети с колеей 1520 мм. Существует большое число возможных сценариев применения НЭ на подвижном составе [4–11]. Описание решаемых ими задач приводится далее при оценке энергоёмкости и мощности.

Хотя области применения различаются по требованиям к мощности и энергоёмкости накопителей, что определяет их массу и габариты, а также по сроку службы НЭ, условия эксплуатации тяговых литиевых аккумуляторных батарей являются схожими независимо от их назначения. В настоящее время накопительные устройства, как правило, проектируются индивидуально для каждой серии подвижного состава. Но по мере расширения области их применения становится актуальной унификация накопительных устройств.

Разработка и производство ряда типоразмеров унифицированных модульных накопителей для тягового подвижного состава (ТПС) создаст предпосылки для более динамичного и эффективного развития новых видов тяги. Такое решение позволит:

1. повысить серийность технических решений, применяемых при производстве накопителей энергии, что стабилизирует их качество и снизит себестоимость;

2. разделить задачи проектирования локомотива и накопителя, что ускорит их разработку и позволит расширить номенклатуру;

3. создать возможность выбора между различными типами накопительных устройств на одном типе подвижного состава;

4. повысить эксплуатационную надёжность подвижного состава с накопителями энергии благодаря простоте их замены;

5. получить возможность стационарного заряда модулей с обменом их в пунктах оборота, если это оправдано условиями эксплуатации;

6. получить возможность обмена накопителями с разной степенью деградации аккумуляторов между локомотивами, эксплуатируемыми на участках с различной протяжённостью автономного хода и руководящим уклоном. Это позволит продлить срок службы накопительных модулей за пределами номинального количества циклов заряда-разряда в условиях, не требующих реализации их полной энергоёмкости.

Стандартизация накопителей соответствует современной тенденции к повышению модульности конструкций локомотивов, реализуемой, например, в семействах тепловозов ТЭМ9, ТЭМ23, ТЭМ33 и некоторыми производителями безрельсового транспорта<sup>15</sup>.

Приведённые данные позволяют сделать вывод, что в ближайшие годы станет актуальной задача создания новых серий ТПС, использующего тяговые накопители энергии. Поэтому в работе ставится *цель*, выполнив анализ характеристик и условий эксплуатации НЭ, показать целесообразность стандартизации тяговых накопителей для разных типов ТПС и для разных целей применения НЭ, а также предложить критерии нормирования параметров накопительных модулей.

<sup>14</sup> Stadler manifests market leadership in alternative drive technologies: DB Regio orders more battery-operated trains. [Электронный ресурс]: <https://www.stadlerail.com/en/media/article/stadler-manifests-market-leadership-in-alternative-drive-technologies-db-regio-orders-more-battery-operated-trains/1080/>. Доступ 22.05.2023.

<sup>15</sup> NIO's battery swap network open to other brands. [Электронный ресурс]: <https://cnevpost.com/2023/04/02/nio-battery-swap-network-open-to-other-brands-like-cloud-service-william-li/>. Доступ 22.05.2023.

Чтобы показать возможные характеристики накопительных модулей для различных серий ТПС и областей применения, в работе выполнена оценка их удельных характеристик и рассмотрены ограничения их конструкции по условиям эксплуатации. Описание использованной в работе методики приводится совместно с полученными результатами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Оценка мощности и энергоемкости бортовых тяговых накопителей

Определение массы и габаритов аккумуляторного накопителя энергии требует нахождения его двух главных параметров: энергоемкости и мощности. Точный их расчет для заданных условий является комплексной задачей, требующей разработки параметров перспективных локомотивов и анализа режимов их эксплуатации. Установка мощных НЭ на существующие серии локомотивов, как правило, невозможна, поскольку это потребует существенного изменения компоновки оборудования, схемы тяговых преобразователей, системы управления, системы вентиляции кузова и т. д.

Важно отметить, что для нахождения мощности и энергоемкости накопителя недостаточно знания распределения мощности, потребляемой тяговым приводом, по времени. Необходимо прогнозировать наибольший и наименьший запас энергии накопителя в течение рейса, для чего следует установить зависимость мощности тягового электропривода от времени тяговым расчетом либо по записям регистраторов параметров движения. Хотя полное решение такой задачи для широкого спектра ситуаций в рамках одной работы невозможно, для задач статьи был выполнен приближенный расчет, позволяющий оценить энергоемкость бортовых накопителей при следующих характерных сценариях их применения.

В случае *повторного использования энергии* электрического торможения при остановке на станции энергоемкость накопителя определяется в первую очередь кинетической энергией движения поезда. В этой ситуации потери на преодоление сопротивления движению малы по отношению к кинетической энергии (1)<sup>16</sup>:

$$E = k \frac{mV^2}{2} . \quad (1)$$

Принято, что мощность накопителя должна обеспечивать реализацию полной мощности тяговых двигателей.

При *выравнивании неравномерностей тяговой нагрузки*, вызванной чередованием режимов из-за особенностей профиля пути, а также наличия ограничений скорости, энергоемкость оценена по мощности локомотива и длительности поддержания заданного режима (2):

$$E = kPt . \quad (2)$$

Как показывает анализ режимных карт, для поездных локомотивов типично чередование позиций контроллера не реже, чем каждые 30 минут. Для электро- и дизель-поездов (МВПС) характерны периодические изменения потребляемой мощности, вызванные остановками для посадки пассажиров. В расчете принято, что время их следования по перегону не превышает, как правило, 15 минут.

При передвижениях на *большое расстояние* расход энергии зависит в первую очередь от средних значений основного и дополнительного сопротивления движению.

При расчете требований к НЭ при *маневровых передвижениях, а также преодолении «последней мили»* для подхода к месту погрузки оценка энергоемкости выполнена для дальности передвижения 10 км при эквивалентном уклоне 5 ‰ по выражению (3):

$$E = kmL(w + ig) . \quad (3)$$

*Автономное движение за счет энергии накопителя по участку протяженностью 100 км и 300 км.* Энергоемкость НЭ также определена по выражению (3). В обоих случаях принято, что перепад высот на участке составляет 500 м, что учтено при задании эквивалентного уклона. Для последних задач потерями энергии, вызванными колебаниями скорости и торможениями, при оценочном расчете допустимо пренебречь.

Поскольку НЭ могут устанавливаться на различные типы ТПС, расчет их характеристик выполнен в удельной форме, на 1000 кВт часовой мощности локомотива. Чтобы перейти от удельных величин к абсолютным, необходимо увеличить их пропорционально мощности локомотива при определении энергоемкости по (2) либо пропорционально массе поезда для выражений (1) и (3). Однако, по-

<sup>16</sup> Принятые в выражениях (1)–(5) обозначения приведены после выражения (5).



сколькx при равных коэффициенте сцепления и ходовой скорости сила тяги локомотива пропорциональна его мощности, массу поезда можно также приближенно считать пропорциональной мощности. Расчетные значения ходовой скорости, уклона и протяженность участков выбраны из соображений обеспечения возможности эксплуатации НЭ на большей части сети. Масса поезда на 1 МВт часовой мощности локомотива с осевой нагрузкой 25 т принята соответствующей критической норме для участков с руководящим уклоном 5 ‰.

При выборе типа накопителей важно учитывать их срок службы. Как показывают исследования долговечности аккумуляторов [12; 13], объем энергии, которую литиевый аккумулятор способен принять в течение срока службы, слабо (в пределах 20 %) зависит от глубины разряда. При получении электрической энергии от сети единственным типом аккумуляторов, для которого стоимость принятой энергии превосходит стоимость ее получения от сети, являются литий-титанатные аккумуляторы [14]. Другим их преимуществом является высокая мощность, что позволяет в ряде случаев значительно сократить массу накопителя и сделать целесообразным его применение на подвижном составе, несмотря на более высокую удельную стоимость по сравнению с литий-железофосфатными аккумуляторами. Именно для этого типа при расчете была выполнена оценка массы и габаритов накопительных устройств.

Масса и объем накопителей определены по их удельным характеристикам, приведенным в табл. 1 в соответствии с (4, 5):

$$m_{ES} = k_m \max \left( \frac{E}{E_S}, \frac{P}{P_S} \right), \quad (4)$$

$$V_{ES} = \frac{k_V}{\rho} \max \left( \frac{E}{E_S}, \frac{P}{P_S} \right). \quad (5)$$

В выражениях (1)–(5):

$E$  – энергоемкость накопителя энергии, кДж;

$k = 1, 2$  – коэффициент, учитывающий потери при преобразовании энергии;

$m$  – масса поезда, перемещаемая одной секцией ТПС, т;

$V$  – ходовая скорость движения поезда, м/с;

$P$  – мощность секции ТПС, кВт;

$t$  – длительность нахождения НЭ в режиме разряда, с;

$w$  – удельное сопротивление движению поезда при скорости  $V$ , Н/т;

$i$  – приведенный уклон на участке аккумуляторной тяги, ‰;

$g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$L$  – дальность передвижения на энергии аккумулятора, км.

$m_{ES}$  – масса НЭ, кг,

$V_{ES}$  – объем НЭ, м<sup>3</sup>,

$E_S$  – удельная энергоемкость НЭ, кДж/кг,

$P_S$  – удельная мощность НЭ, кВт/кг,

$k_m = 1,5$  – отношение общей массы модуля к массе аккумулятора,

$k_V = 2$  – отношение общего объема модуля к объему аккумуляторов,

$\rho$  – плотность аккумуляторов, кг/м<sup>3</sup>.

При расчете принято, что объем модуля с учетом корпуса и системы управления батареями в 2 раза превышает объем элементов аккумулятора, а масса модуля – в 1,5 раза. Во всех случаях дополнительно учтен запас на потери при электрическом и электрохимическом преобразованиях энергии, принятый равным 20 % энергоемкости накопителя. Сопротивление движению  $w$  определено по требованиям Правил тяговых расчетов<sup>17</sup>.

Результаты расчета приведены в табл. 2.

Как показывают результаты расчета, в случае применения литий-титанатных аккумуляторов для большинства областей применения НЭ, кроме приема энергии торможения (требующего наименьшего запаса энергии), их параметры определяются по энергоемкости. В то же время, для литий-железофосфатных аккумуляторов в большинстве случаев лимитирующим параметром является мощность батареи. По совокупности характеристик в настоящее время целесообразно применение литий-титанатных аккумуляторов для большинства областей применения, кроме обеспечения передвижений на большие дистанции [14].

Поскольку на этапе проектирования новой серии ТПС конструктор обладает свободой выбора мер по повышению прочности кузова и изменению схемы электрооборудования, то задача включения НЭ в конструкцию локомотива представляется вполне разрешимой.

<sup>17</sup>Правила тяговых расчетов для поездной работы. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 515 с.



Важнейшей принципиальной проблемой на этом пути представляется обеспечение возможности сохранить мощность локомотива, не выходя за ограничения по габариту и осевой нагрузке. На уровне концепции, до разработки проекта, можно отметить, что существующие серии ТПС, имеющие общий род тяги и назначение, могут иметь различие по мощности на единицу массы, превышающее 20 %. Это позволяет предположить возможность сокращения массы и габаритов оборудования для установки бортовых НЭ сравнительно небольшой емкости общей массой до 10–15 т и объемом до 10 м<sup>3</sup>. Для задач, требующих наиболее высокой емкости НЭ (аккумуляторный ход на большие дистанции, преодоление подъемов на перевальных участках), можно предложить вынос их в специализированную секцию, если текущий уровень удельной энергоемкости и стоимости НЭ допускает такое решение.

### Основные требования к накопителям энергии

Условия эксплуатации накладывают ряд ограничений на конструкцию НЭ, которые необходимо определить при составлении технических требований. К ним относятся:

1. Определение общих массы и габаритов НЭ, исходя из требований по мощности и энергоемкости, а также в целях обеспечения режимов работы и удобства эксплуатации. Это позволит назначить удобный в эксплуатации базовый размер модуля, которому будут кратны возможные типы накопителей.

2. Выбор номинального напряжения (ряда напряжений) модуля и количества последовательно соединенных элементов в нем. Номинальное напряжение тяговых накопителей обуславливается в первую очередь удобством их сопряжения с силовыми цепями локомотива.

3. Выбор системы выравнивания заряда, поскольку литиевые аккумуляторы повреждаются при перезаряде. Известно большое количество схемных решений таких систем [15; 16], отличающихся величиной потерь энергии и стоимостью. Нет необходимости их стандартизации, однако может быть важным учесть требование к возможности отключения части элементов для управления напряжением батареи и повышения ее надежности.

4. Обеспечение температурного режима. Хотя современные тяговые аккумуляторы

имеют относительно широкий диапазон рабочих температур (от –40 до +65 °С для Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>12</sub>, от –45 до +85 °С для LiFePO<sub>4</sub>) [15–17], опыт их эксплуатации говорит о необходимости сужения диапазона для поддержания высоких энергетических и мощностных характеристик элементов. В зависимости от величины протекающего тока и температуры может требоваться как охлаждение, так и подогрев батарей [17].

Для подогрева модуля в зимнее время в его конструкцию необходимо ввести нагревательные элементы, а также выполнить внешнюю термоизоляцию. Охлаждение может быть обеспечено с применением различных теплоносителей. Наиболее простым решением является использование окружающего воздуха. В этом случае целесообразно предусмотреть внешнюю систему централизованной его подачи.

5. Проектирование интерфейса накопителя, под которым далее понимается комплекс технических требований, обеспечивающих механическое, электрическое и логическое сопряжение сменных модулей с системами локомотива, перечисленных ниже.

5.1. Механическое крепление, обеспечивающее надежную фиксацию модуля и возможность его быстрого демонтажа.

5.2. Соединение с вентиляционными каналами для подачи и отвода охлаждающего воздуха с возможностью перекрытия каналов при работе в условиях низких температур.

5.3. Соединение с шинами постоянного тока для приема и передачи электрической энергии от тягового преобразователя.

5.4. Обеспечение электропитания собственных нужд модуля в случае использования внешнего источника питания с учетом мощности на обеспечение его термостатирования.

5.5. Подключение к информационной шине для обеспечения связи с системой управления локомотива.

6. Микропроцессорная система управления и диагностики. Система управления должна выполнять ряд функций, которые перечислены ниже.

6.1. Определение степени заряда накопителя.

6.2. Сбор диагностической информации для контроля степени износа элементов батареи. Оценка запаса энергии каждой из групп элементов по напряжению на ней и величине прошедшего тока.

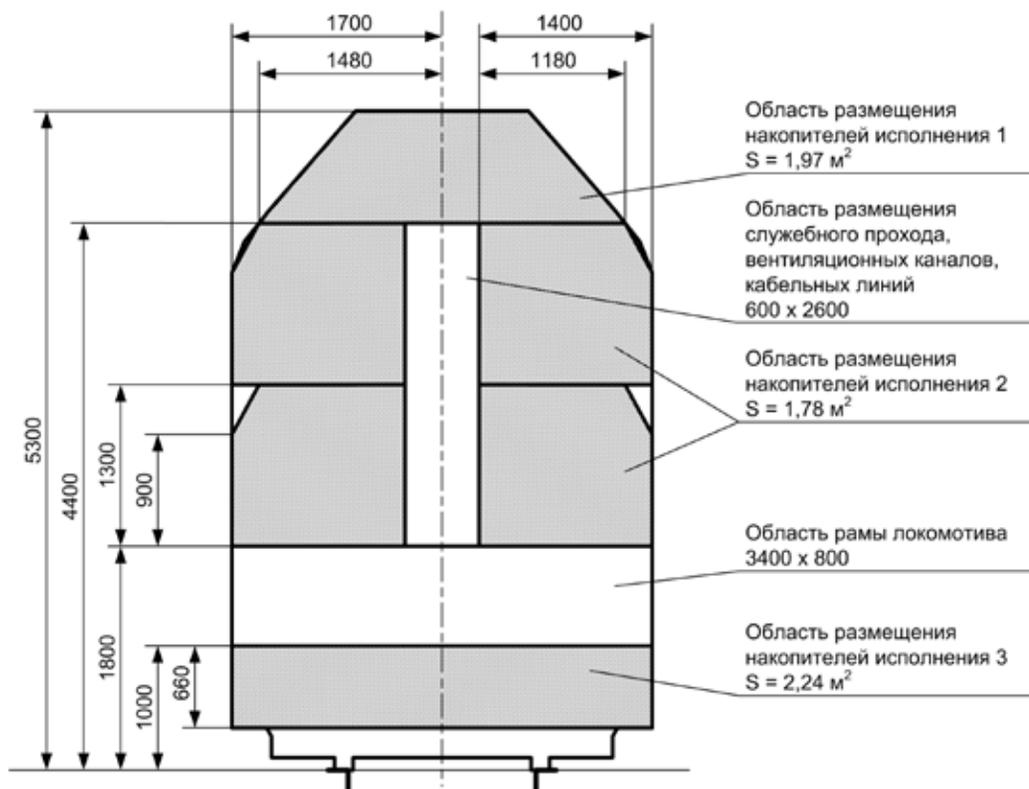


Рис. 1. Зоны возможного размещения накопителей энергии в габарите 1-Т [выполнено автором].

6.3. Управление температурой модуля и выравниванием заряда.

6.4. Отключение модуля в случае перенапряжения, коротких замыканий, перегрева, пожара.

6.5. Связь с системой управления локомотива, а также индикация уровня заряда и аварийных состояний на корпусе модуля. Для обеспечения универсальности и сохранения пропускной способности линий связи целесообразно выделить специализированную шину, использующую один из часто применяемых протоколов передачи данных, например CAN. При этом головной контроллер линии связи обеспечивает взаимодействие накопителей с системой управления локомотива и должен разрабатываться с учетом особенностей конкретной серии.

7. Влияние требований по стоимости и надежности модулей на их конструкцию. Несмотря на долговременную тенденцию к снижению стоимости накопителей, элементы аккумуляторов продолжают составлять наибольшую долю стоимости модуля накопления энергии. Это оправдывает увеличение

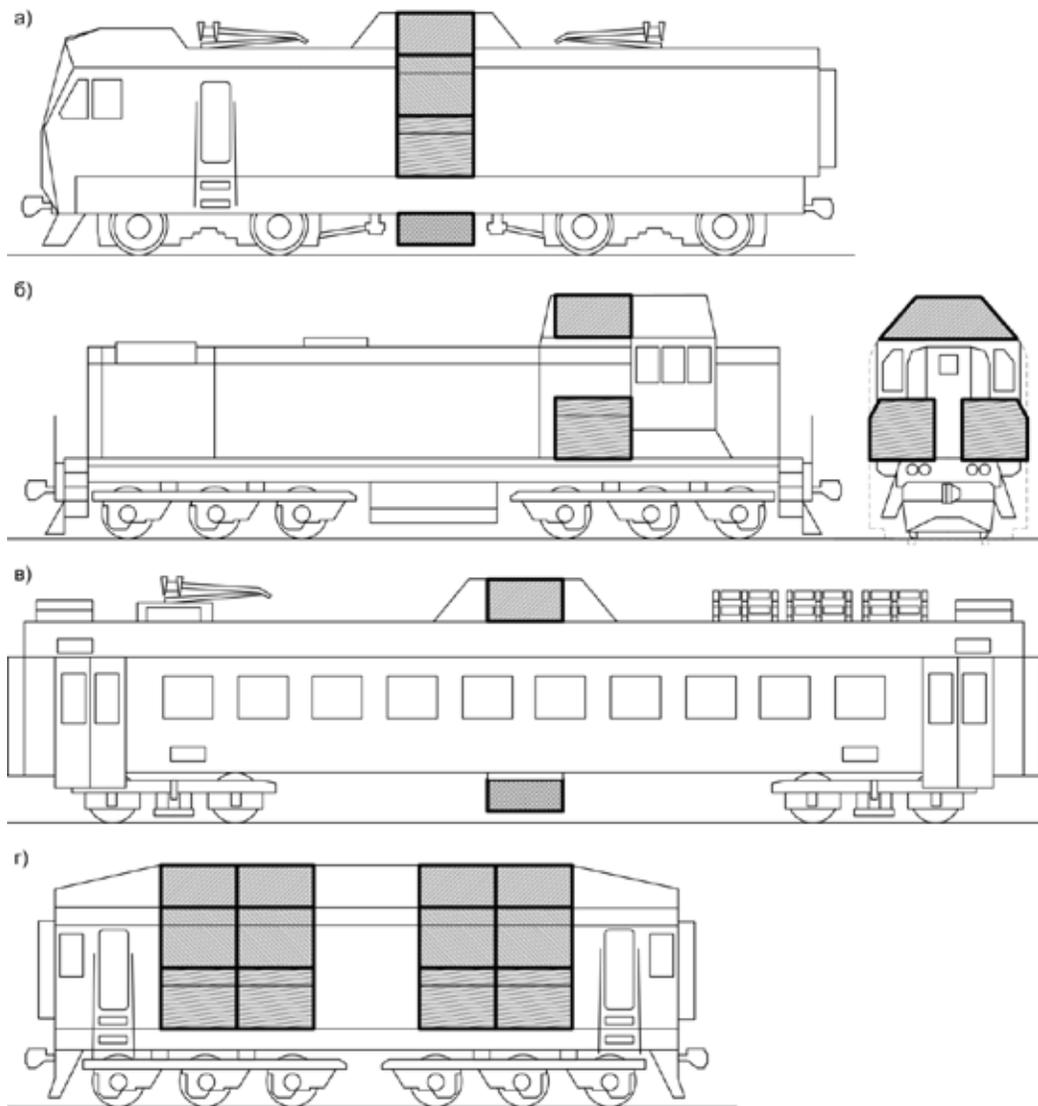
сложности конструкции накопительных модулей ради повышения срока службы аккумуляторов. Эффективность решений по выравниванию заряда и обеспечению температурного режима должна определяться с учетом эффекта от увеличения срока службы накопителей и сокращением потерь энергии в них.

### Обоснование основных параметров аккумуляторных модулей

Далее выполнен анализ условий, в наибольшей степени влияющих на количество и схему соединения элементов в составе модуля.

*Энергоемкость, габариты и масса.* Мощность построенных за последнее десятилетие серий локомотивов изменяется от 880 кВт (ТЭМ18ДМ) до 6600 кВт (ЭП20), изменяясь между массовыми сериями ступенями по 600–1000 кВт, т. е. 10–15 % от максимальной. Чтобы обеспечить применимость в широком диапазоне мощности ТПС, необходимо ограничить энергоемкость модуля 1000–2000 МДж. Для обеспечения маневровых передвижений могут быть использованы модули





**Рис. 2.** Возможные варианты размещения модульных накопителей энергии: а – на магистральных локомотивах, б – на маневровых локомотивах, в – на моторвагонном подвижном составе, г – на специализированной секции. Количество модулей может варьироваться в зависимости от цели установки накопителя [выполнено автором].

энергоемкостью 100–200 МДж. Помимо требования кратности энергоемкостей НЭ и отдельного модуля при различии в назначении НЭ и мощности локомотива, размеры модулей ограничиваются также конструктивными и эксплуатационными требованиями.

Для снижения потерь тепла в зимнее время, сокращения массы корпуса и теплоизоляции целесообразно сократить наружную поверхность модуля, приняв близкие габаритные размеры по всем осям, а также увеличить размеры и запас энергии модулей. Для обеспечения свободы компоновки перспективных локомотивов и упрощения их проектирования желательно, наоборот, уменьшить размеры

модулей. Возможность использования массовой грузоподъемной техники и транспортировки модулей автомобильным транспортом требует, чтобы масса модуля была ограничена 5 т либо 10 т<sup>18</sup>. Уточнение их параметров требует учета конструктивных требований, определяющих возможность размещения и обслуживания модулей на подвижном составе.

При разработке предложений была поставлена задача разбить объем, допускающий размещение накопителей в габарите подвижного состава, на части равного сечения, чтобы

<sup>18</sup> ГОСТ 1575-87 Краны грузоподъемные. Ряды основных параметров. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2002. – 9 с.

уравнять длину и энергоемкость модулей. Как показано на рис. 1, в сечении габарита 1-Т<sup>19</sup> возможно выделить шесть зон сечением около 2 м<sup>2</sup> каждая. Это позволяет принять массу одиночного модуля равной 5 т, а длину 1,7–1,8 м. Возможные компоновочные решения для разных применений накопителей представлены на рис. 2.

Для накопителей, размещаемых в кузове локомотива, предложено симметричное их расположение при сохранении между модулями прохода шириной 600 мм. Нижнюю границу зоны расположения накопителей предложено установить на высоте 1800 мм от уровня головки рельса (УГР), что определено размерами рам большинства серий локомотивов. Верхняя граница задана в соответствии с очертанием габарита 1-Т. Такая схема позволяет устанавливать модули как вертикально, подъемным краном, так и горизонтально, при помощи погрузчиков.

Высота верхней точки крыши (без учета оборудования) современных одноэтажных электропоездов и пассажирских вагонов не превышает 4400 мм от УГР. Поэтому предложено размещение модулей в пределах габарита 1-Т выше этого уровня. Накопители, размещаемые под вагоном, предлагается разместить в пределах габарита до высоты 1000 мм, что определяется наименьшим стандартным диаметром колеса.

*Номинальное напряжение.* Величина номинального напряжения тягового накопителя также является одним из факторов, наиболее тесно связанных с главными конструктивными решениями локомотивов. Накопитель является источником энергии тягового электрооборудования так же, как контактная сеть электровоза либо тяговый генератор теплового (далее называемые первичным источником энергии).

Учитывая, что заряд НЭ требует возможности плавного регулирования напряжения на нем, можно предполагать, что накопители найдут применение в первую очередь на подвижном составе с четырехквadrантными тяговыми преобразователями. Только в этом случае реализуется возможность приема энергии торможения и достигаются все преимущества накопления энергии. Как исключение, может быть применен менее энерго-

эффективный, но более простой вариант установки зарядного преобразователя на контактно-аккумуляторном подвижном составе с сохранением контакторного регулирования скорости.

Поскольку накопитель подключается к тяговому преобразователю, его диапазон рабочих напряжений должен приблизительно соответствовать диапазону напряжений первичного источника энергии. Такое решение упростит схему и повысит КПД преобразования энергии.

Для обоснования уровня напряжения выполнен обзор характеристик современного ТПС с асинхронным тяговым приводом<sup>20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27</sup>. На ТПС с возможностью питания от контактной сети 3 кВ напряжение звена постоянного тока, как правило, соответствует напряжению контактной сети. В остальных случаях напряжение, как правило, принимается в диапазоне 1400–2800 В. Минимальный его уровень должен быть достаточен для формирования инвертором напряжения на тяговом двигателе. Поскольку асинхронные тяговые двигатели не имеют ограничений по коммутации, для оптимизации характеристик статорных обмоток их номинальное линейное напряжение выбирают в диапазоне 1,4–2,5 кВ [18, 19].

Можно ожидать, что ряд типов ТПС сохранит возможность прямого подключения тягового преобразователя к сети 3 кВ. Поэтому целесообразно принять номинальное напряжение накопителя соответствующим напряже-

<sup>20</sup> Зайцев Г. К. Устройство, эксплуатация и ремонт тепловозов серии 2ТЭ25А (2ТЭ25К). – М.: ОАО «РЖД», 2014. – 400 с. ISBN 978-5-89035-733-5.

<sup>21</sup> Преобразовательная техника [Электронный ресурс]: [https://dals.spb.ru/index.php/ru/preobrazovatel'naya\\_tekhnika](https://dals.spb.ru/index.php/ru/preobrazovatel'naya_tekhnika). Доступ 22.05.2023.

<sup>22</sup> Электропоезд с асинхронным тяговым приводом типа ЭГЭ серии ЭС2Г: Руководство по эксплуатации ЭС2Г.0.00.000.000–01 РЭЗ. – Книга 4. – Екатеринбург: ОАО «Уральские локомотивы», 2016. – 106 с.

<sup>23</sup> Электропоезд пригородного следования городского типа ЭГ2Тв модель 62–4496: Руководство по эксплуатации 4496.00.00.000 РЭ. – Тверь: ОАО «ТВЗ», 2016. – 536 с.

<sup>24</sup> Осинцев И. А., Логинов А. А. Устройство и эксплуатация электровоза 2ЭС10. – М.: ОАО «РЖД», 2014. – 334 с. ISBN 978-5-89035-786-1.

<sup>25</sup> Смаглюков Д. А. Устройство и эксплуатация электровоза ЭП20. – М.: ОАО «РЖД», 2015. – 361 с. ISBN 978-5-89035-787-8.

<sup>26</sup> ЦТ-453/08 Правила эксплуатации электровозов серии КЗ4А. – Астана, 2008. – 446 с.

<sup>27</sup> Загорцев В. А. и др. Грузовой электровоз БКГ-1. – Гомель: БелГУТ, 2021. – 271 с. ISBN 978-985-554-958-2.

<sup>19</sup> ГОСТ 9238-2013 Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. – М.: ИПК изд-во стандартов, 2014. – 178 с.



**Основные характеристики модульных тяговых накопителей энергии для установки на подвижном составе [выполнено автором]**

Тип НЭ	LiFePO <sub>4</sub>	Li <sub>4</sub> Ti <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	КДЭС
Масса, т	5		
Объем, м <sup>3</sup>	от 3,0, в зависимости от зоны размещения		
Энергоемкость, кВт·ч	625	300	15
Мощность разряда, кВт	1200	6000	не ограничена для тяговых накопителей
Мощность заряда, кВт	600	6000	
Номинальное напряжение, В	3000		
Номинальный ток, А	400	2000	> 5000



нию контактной сети постоянного тока. Стандартный диапазон напряжений контактной сети составляет 2000–3600 В<sup>28</sup>, что практически совпадает с рабочими напряжениями литий-титанатной батареи номинальным напряжением 3070 В из 1330 элементов.

Установка индивидуальных преобразователей напряжения в накопительных модулях представляется нецелесообразной. Современные полупроводниковые приборы имеют высокую единичную мощность. Применение единого тягово-зарядного преобразователя сократит массу, объем и общую стоимость оборудования, упростит систему управления. Отказ от преобразователей напряжения в составе модулей накопителя повысит также общую надежность системы. Высокая мощность модулей обеспечит возможность их непосредственного параллельного соединения.

*Энергоемкость и мощность.* Основные параметры предложенных модулей в заданных габаритах представлены в табл. 3. Энергоемкость модуля на основе литий-титанатных аккумуляторов составит 300

кВт·ч, а номинальная мощность – 6000 кВт, что делает допустимой установку на локомотиве даже одиночного модуля.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе отмечены перспективы создания новых серий подвижного состава железных дорог с бортовыми накопителями энергии и перечислены задачи, которые должны быть решены при их применении. Обоснована целесообразность разделения задач проектирования локомотивов и накопительных модулей. Приведен перечень требований, выполнение которых обеспечит взаимозаменяемость накопительных модулей. Выполнена оценка удельных мощности и энергоемкости модулей для различных вариантов их применения.

Предложено применение унифицированных модулей массой 5 т. Например, установка 2–3 модулей на секции грузового локомотива мощностью 3000 кВт позволит обеспечить постоянство нагрузки на его первичный источник энергии. Установка одного модуля на секции электропоезда мощностью 1200 кВт позволит не только решить эту задачу, но и обеспечить автономный ход дальностью около 100 км. В даль-

<sup>28</sup> ГОСТ 29322-92 (МЭК 38–83) Стандартные напряжения. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 7 с.

нейшем эти рекомендации могут быть уточнены, однако решение этой задачи потребует выполнить анализ условий эксплуатации подвижного состава с накопителями энергии, учитывая особенности планируемых участков его обращения.

В перспективе область применения накопителей будет увеличиваться по мере снижения стоимости аккумуляторов, развития альтернативных материалов с меньшей стоимостью и разработки новых типов накопителей с большей энергоемкостью. Стандартизация и обеспечение взаимозаменяемости накопителей не только упростит и ускорит появление новых технологий, но и создаст ряд новых возможностей по их применению. Это делает целесообразным учет требований к НЭ уже на этапе задания параметров перспективных типов подвижного состава.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перспективы тяговых аккумуляторных батарей на железнодорожном транспорте // Железные дороги мира. – 2023. – № 1. – С. 43–48. [Электронный ресурс]: <https://zdmira.com/articles/perspektivy-tyagovykh-akkumulyatornykh-batarej-na-zheleznodorozhnom-transporte>. Доступ 22.05.2023.
2. Battery traction recharges decarbonisation fight. [Электронный ресурс]: <https://www.railjournal.com/in-depth/battery-traction-recharges-decarbonisation-fight/>. Доступ 22.05.2023.
3. Yu Miao, Hynan, P., von Jouanne, A., Yokochi, A. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies*, 2019, Vol. 12, Iss. 6, article ID 1074. DOI: 10.3390/en12061074.
4. Незевак В. Л., Шагохин А. П. Характеристика тяговой нагрузки для определения параметров накопителя электрической энергии // Мир транспорта. – 2018. – Т. 16. – № 2 (75). – С. 84–94. DOI: 10.30932/1992-3252-2018-16-2-8.
5. Логнинова Е. Ю., Кузнецов Г. Ю. Повышение тяговых характеристик тепловоза с гибридной энергетической установкой // Мир транспорта. – 2022. – Т. 20. – № 3 (100). – С. 21–29. DOI: 10.30932/1992-3252-2022-20-3-3.
6. Валинский О. С., Евстафьев А. М., Никитин В. В. К вопросу определения емкости накопителя энергии для тягового подвижного состава железных дорог // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2021. – № 2. – С. 8–11. [Электронный ресурс]: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/93a/16167j3bpgez0e4eg5atib9ea6wqk2ei.pdf>. Доступ 22.05.2023.
7. Сычугов А. Н. Программа расчета параметров накопителей электрической энергии для автономного тягового

подвижного состава: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. – Рег. № 2022619798 от 26.05.2022. Заявка № 2022618257 от 05.05.2022.

8. Шевлюгин М. В., Желтов К. С., Плетнев Д. С., Глушенко М. Д. Экспериментальное исследование автономного хода электроподвижного состава метрополитена // Электротехника. – 2021. – № 9. – С. 19–21. [Электронный ресурс]: <http://www.znack93.ru/images/archive/2021/09-2021.pdf>. Доступ: 22.05.2023.

9. Штанг А. А., Ярославцев М. В. Контактно-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 1. – С. 13–16. [Электронный ресурс]: <http://eet-journal.ru/upload/iblock/1f2/9t3gxbj6vx070j9idtu2n7tp9k8gfv6.pdf>. Доступ: 22.05.2023.

10. Ярославцев М. В., Щуров Н. И., Аносов В. Н. Энергоэффективный тяговый привод городского безрельсового транспорта. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2017. – 135 с. ISBN 978-5-7782-3274-7.

11. Кузнецов Г. Ю., Логнинова Е. Ю. Повышение технических характеристик автономных локомотивов с литий-ионной тяговой батареей // Известия Транссиба. – 2022. – № 4 (52). – С. 57–65. [Электронный ресурс]: [http://izvestia-transsiba.ru/images/journal\\_pdf/2022-4\(52\).pdf](http://izvestia-transsiba.ru/images/journal_pdf/2022-4(52).pdf). Доступ 22.05.2023.

12. Zhou Chengke, Qian Kejun, Allan, M., Zhou Wenjun. Modeling of the Cost of EV Battery Wear Due to V2G Application in Power Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2011, Vol. 26, pp. 1041–1050. DOI: 10.1109/TEC.2011.2159977.

13. Rosenkranz C., Kohler U., Liska J. L. Modern battery systems for plug-in hybrid electric vehicles. *Power*, 2007, Vol. 1, 100. [Электронный ресурс]: <https://dSPACE.tul.cz/server/api/core/bitstreams/b7580d40-7453-449d-9200-7601400c6569/content>. Доступ 22.05.2023.

14. Спиридонов Е. А., Ярославцев М. В. Оценка эффективности применения накопителей энергии на карьерном железнодорожном транспорте // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2022. – № 12/2. – С. 241–256. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_122\_0\_241.

15. Gallardo-Lozano, J., Romero-Cadaval, E., Milanese-Montero, M. I., Guerrero-Martinez, M. A. Battery equalization active methods. *Journal of power sources*, 2021, Vol. 246, pp. 934–949. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2013.08.026.

16. Xing Yinjiao, Ma Eden, W. M., Tsui Kwok, L., Pecht, M. Battery management systems in electric and hybrid vehicles. *Energies*, 2011, Vol. 4, Iss. 11, pp. 1840–1857. DOI: 10.3390/en4111840.

17. Nema, P., Muthukumar, P., Thangavel, R. Review on Thermal Management System of Li-Ion Battery for Electric Vehicle. In: Sustainable Energy Generation and Storage: Proceedings of NERC 2022, Springer Nature, 2023. pp. 165–184. DOI: 10.1007/978-981-99-2088-4\_14.

18. Андрищенко А. А., Бабков Ю. В., Зарифьян А. А. [и др.]. Асинхронный тяговый привод локомотивов – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2013. – 413 с. ISBN 978-5-89035-631-4.

19. Щербаков В. Г., Петрушин А. Д., Хоменко Б. И., Седов В. И. Тяговые электрические машины. – М.: УМЦ по образованию на ж. д. транспорте, 2016. – 641 с. ISBN 978-5-89035-926-1.

### Информация об авторе:

**Ярославцев Михаил Викторович** – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры электротехники и автоматизации Некоммерческого акционерного общества «Торайгыров университет» (НАО «Торайгыров университет»), Павлодар, Республика Казахстан, [myaroslavtsev@yandex.ru](mailto:myaroslavtsev@yandex.ru).

Статья поступила в редакцию 06.06.2023, актуализирована 20.12.2023, одобрена после рецензирования 26.12.2023, принята к публикации 27.12.2023.

