

УДК 620.97, 621.331, 629.433, 629.085

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ГОРЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

*А.В. Кацай*¹, *М.В. Шевлюгин*²

¹ООО «Кинемак»

Россия, 115201, г. Москва, Каширский пр-д, 13, стр. 2

²Российский университет транспорта

Россия, 127994, г. Москва, ул. Образцова, 9, стр. 9

E-mail: proton764@mail.ru, mx_sh@mail.ru

***Аннотация.** Рассмотрена эффективность работы накопителей энергии стационарного и бортового исполнения в контактной сети горэлектротранспорта (трамвая, метро). Выведены коэффициенты полезного действия накопительных устройств в зависимости от полноты рассмотрения систем накопления и способов их применения. В соответствии с установленными формулами расчета разных типов КПД проанализирована эффективность отечественных накопителей энергии различного типа, примененных на горэлектротранспорте. Установлено, что при прочих равных характеристиках стационарные накопители энергии более эффективны, чем таковые бортового исполнения.*

***Ключевые слова:** накопитель энергии, накапливающий элемент, преобразователь, эффективность, потери энергии, типы КПД, контактная сеть ГЭТ, рекуперация, бортовое и стационарное применение*

Введение

В работе буферных накопителей энергии, как и любых иных устройств, имеются безвозвратные потери энергии с точки зрения ее полезного применения. Эти потери зависят как от типа накопителя энергии, так и от условий его применения, поскольку конфигурация сетей и место накопителя в них также сильно влияют на его эффективность. Целью настоящего исследования ставится выведение системы определения эффективности работы накопителей энергии различной структуры (управляемых и неуправляемых, с разными типами накопительных элементов) и различного применения (бортовых и стационарных) для обеспечения исследователей и потенциальных пользователей этих устройств действенным единым методическим инструментом для их сравнения. Кроме того, на основе полученной системы определения коэффициентов полезного действия накопителей необходимо определить эти показатели для устройств, испытания которых проводились в электрифицированном транспорте России.

Возможный КПД системы накопления энергии для ГЭТ

Системы накопления энергии (СНЭ) любого типа состоят из двух подсистем:

¹ Кацай Александр Владимирович, генеральный директор.

² Шевлюгин Максим Валерьевич, доцент, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электроэнергетика транспорта».

– собственно энергонакапливающего элемента (НЭ), например химических ячеек, суперконденсаторов, маховика и т. п.;

– преобразователя энергии, который позволяет переводить сетевую электроэнергию в форму, соответствующую типу накапливающего элемента, при запасании ее и обратно, когда необходимо возвращать эту ранее накопленную энергию в электрическую сеть для потребления сетевой нагрузкой.

Для городского электротранспорта (ГЭТ) на текущий период наиболее актуальными являются три типа накопителей энергии – литиевые аккумуляторы, суперконденсаторы и маховичные накопители, которые по своим базовым параметрам – мощности и энергоемкости – соответствуют режимам работы этой сети – резко переменным. Поскольку у накопительного элемента за один полный цикл есть только три процесса – прием энергии, хранение и выдача, то сумма потерь энергии складывается из потерь на этих этапах. Так, по данным многих исследователей, например в [1], КПД цикла работы емкостного и суперконденсаторного накопителя зависит в наибольшей степени от времени хранения энергии в конденсаторе. Для разработанных до настоящего времени моделей конденсаторов и суперконденсаторов условие высокого КПД достижимо только для сравнительно коротких сроков хранения энергии и зависит от величины сопротивления утечке зарядов. Исходя из результатов анализа записей осциллограмм работы стационарных накопителей в ходе их испытаний – маховичного и емкостного – в контактных сетях соответственно трамвая и метро было установлено, что за рабочий день электротранспорта продолжительностью 17 часов количество циклов приема-выдачи избыточной энергии рекуперации на участках одной ТП составляло от 3000 до 4000. Средняя продолжительность одного цикла, включая этапы приема, хранения и выдачи энергии, составило 17,486 секунды. Для бортовых накопителей количество событий работы существенно меньше, т. к. они принимают и выдают только энергию своего вагона, а количество событий рекуперативного торможения вагона практически совпадает с количеством остановов в ходе выполнения перевозок – до 300–400 за рабочий день продолжительностью до 17 часов. Средняя продолжительность цикла работы накопителя определяется временами приема энергии при торможении вагона, хранения ее во время остановки и выдачи в период разгона и составляет порядка 60–90 секунд, из которых время хранения совпадает с чистым временем стоянки – до 60 секунд. С учетом вышеприведенных величин продолжительности циклов работы накопителей, в которых величина периода хранения энергии, когда происходит только саморазряд разных типов накопительных элементов, невелика, для упрощения рассмотрения на начальном этапе исследования модели применения накопителей можно принять предположение, что время хранения энергии в накопительном элементе минимально, т. е. что потери энергии на этом этапе работы равны нулю. В ходе дальнейшего разворачивания исследования потери энергии в накопительных элементах в период хранения, от которых мы в данный момент отвлекаемся, будут привлечены для определения полного эффекта от функционирования этих устройств. С учетом этого предположения объем потерь в накопительном элементе есть сумма потерь при приеме энергии и при выдаче энергии. КПД накопительного элемента, входящего в системы накопления энергии, рассчитывается по формуле

$$\eta_{\text{возм}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{НЭ}}}{E_{\text{зап}}^{\text{НЭ}}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{выд}}^{\text{нэ}}$ – энергия, выданная накопительным элементом в той форме, в которой он может выдавать ее в преобразовательное устройство СНЭ; $E_{\text{зап}}^{\text{нэ}}$ – энергия, полученная накопительным элементом от преобразовательного устройства СНЭ в той форме, в которой он может хранить ее.

Поскольку практически во всех современных накопителях энергии присутствует устройство преобразования энергии из той формы, в которой она выдается накопителем энергии, в ту форму и с теми параметрами, которые может принять контактная сеть ГЭТ, а без преобразователей накопительные системы практически не применяются, и поскольку в формуле (1) потери энергии в преобразователе еще не учитываются, то вычисляемый параметр по этой формуле назовем возможным КПД накопителя энергии ($\eta_{\text{возм}}$).

Основные потери при работе маховичного накопителя энергии образуются от воздушного трения вращающихся частей, потерь на трение в подшипниках, вибрационных и звуковых потерь, а также потерь тока на нагрев обмоток мотор-генератора как в режиме зарядки, так и в режиме выдачи запасенной энергии [7, 8]. При условии минимизации времени хранения энергии, так же как и у накопителей емкостного типа, КПД цикла работы маховичного накопительного элемента (состоящего из маховика и мотор-генератора) ($\eta_{\text{возм}}^{\text{max}}$) имеет довольно высокие значение, достигая уровня этого показателя в 0,98–0,99 при высоких мощностях обмена энергией.

Основные потери в цикле работы аккумуляторного накопителя энергии выражаются в нагреве электрохимических ячеек и некоторых других явлениях. Причем активные потери происходят как в процессе зарядки аккумулятора, так и в процессе его разрядки на полезную нагрузку. Т. е. электрические потери в таких накопителях необходимо за один цикл учитывать дважды, как, впрочем, в любых типах накопителей энергии. Т. к. в качестве буферных накопителей энергии аккумуляторы практически не применяются (в подвижном составе с удлиненным автономным ходом они используются как дополнительный вторичный источник питания, а не как быстродействующий буферный накопитель), то далее аккумуляторные технологии мы рассматривать не будем.

Основные потери в емкостном накопителе (конденсатор, суперконденсатор) происходят от саморазряда при хранении. На рис. 1 показаны значения зарядных и разрядных энергий емкостного неуправляемого накопителя энергии (ЕНЭ) в течение суток, а также его возможный КПД (верхняя черная линия), который в среднем за сутки составил 95 %. Данный накопитель проработал длительное время на тяговой подстанции Т-23 филевской линии московского метрополитена [6].

Так как эксплуатационные службы предприятий ГЭТ интересуют характеристики действующих устройств, состоящих из накопительных элементов и преобразователей энергии, а не их отдельных частей, то для понимания свойств накопительных систем важны энергетические показатели полной системы СНЭ, а не только отдельной, хотя и важнейшей его части. Как правило, этот промежуточный показатель – возможный КПД – мало их интересует, т. к. не раскрывает полной картины эффективности устройства. Обычно этот показатель возможного КПД приводится исследователями и разработчиками накопителей энергии на стадии изучения параметров накопительных элементов. Исключением служат

неуправляемые накопители, у которых преобразователя энергии нет, как в случае с емкостным накопителем в описании к рис. 1.

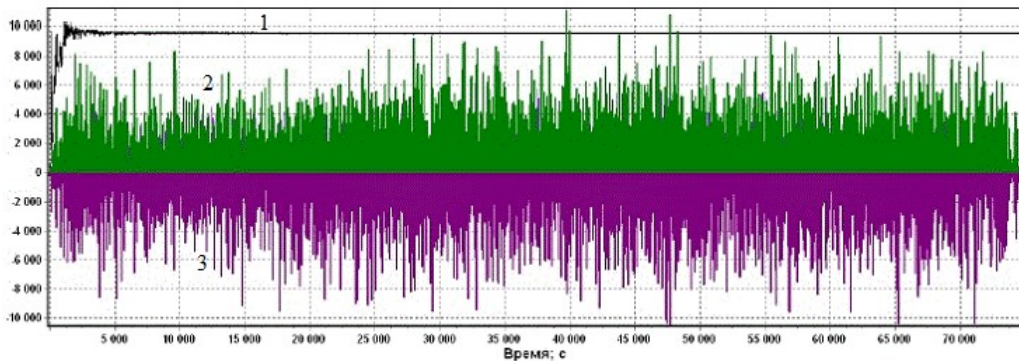


Рис. 1. Энергии заряда и разряда ЕНЭ, а также возможное КПД в функции времени за сутки. Ось абсцисс – секунды. Ось ординат – 1 – КПД емкостного аккумуляторного накопителя * 10 000; 2 – энергия зарядки накопителя, 3 – энергия, выданная накопителем

Действительный КПД системы накопления энергии для ГЭТ

Более полную характеристику эффективности СНЭ дает интегральный показатель КПД для обобщенного режима эксплуатации накопителя, учитывающий потери энергии не только в накопительном элементе, но и в преобразующем устройстве. Как правило, в современных системах управления накопителем электроэнергии используются силовые электронные устройства на IGBT транзисторах. Полный КПД таких преобразователей достаточно высок в силу малых потерь в силовых транзисторах и небольшого энергопотребления драйверами этих элементов. Инверторы применяются с одним, двумя или тремя ступенями преобразования, с различными типами транзисторов, драйверов, конденсаторов, топологией электрических схем и другими особенностями. Однако уровень потерь в таких системах относительно невелик. Для накопителей энергии с накопительными элементами разных типов (суперконденсаторные, электрохимические, электромеханические (маховичные)) применяются инверторы со схожими характеристиками, в т. ч. одних и тех же производителей, и для целей настоящего исследования с небольшими допущениями можно принять, что этот показатель примерно одинаков. Обычно производители преобразователей указывают КПД для направленности преобразования энергии только в одну сторону. Примем также допущение, что эффективность преобразовательного устройства, где энергия циркулирует в обе стороны, одинакова в обе стороны его работы (как на накопительный элемент, так и на сеть). Поскольку инвертор в накопителе для ГЭТ есть обратимое устройство, т. е. он может как получать энергию из сети, так и выдавать ее в сеть, то полный КПД преобразователя за один цикл ($\eta_{\text{цикл}}^{\text{преобр}}$) будет равен произведению этих коэффициентов при прямом ($\eta_{\text{прям}}^{\text{преобр}}$) и обратном преобразованиях ($\eta_{\text{обрат}}^{\text{преобр}}$):

$$\eta_{\text{цикл}}^{\text{преобр}} = \eta_{\text{прям}}^{\text{преобр}} * \eta_{\text{обрат}}^{\text{преобр}} . \quad (2)$$

Поскольку система накопления энергии, состоящая из накопительного элемента и преобразовательного устройства, есть функционально завершённое действующее в сети устройство, то интегральный КПД ее будем называть действи-

тельным КПД ($\eta_{\text{действ}}$). Действительный КПД системы накопителя энергии с учетом его работы на прием и на выдачу энергии рассчитывается как связка этих параметров в процессе заряда и в процессе разряда накопительного элемента. За один цикл СНЭ накопительный элемент совершает два процесса работы по приему и выдаче энергии, так же как и преобразовательное устройство – два процесса за один цикл: прием из сети с выдачей на накопительный элемент и прием от накопительного элемента с выдачей в сеть. С учетом этого действительный КПД СНЭ за один цикл работы выражается в формуле

$$\eta_{\text{действ}} = \eta_{\text{возм}} * \eta_{\text{цикл}}^{\text{преобр}}. \quad (3)$$

Поскольку значение КПД любого устройства меньше единицы, то очевидно, что возможная эффективность больше, чем действительная эффективность накопителя:

$$\eta_{\text{действ}} < \eta_{\text{возм}} < 1. \quad (4)$$

Действительный КПД накопителя энергии за период работы устройства, например рабочий день, неделю, месяц и т. д., достаточно легко выяснить инструментально, установив на входе в преобразователь двунаправленный счетчик электроэнергии. В этом случае показатель по формуле (3) рассчитывается непосредственно из значений таким образом установленного счётчика по запасенной энергии ($E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}}$) и выданной энергии ($E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}$) для функционально полного накопителя, состоящего из накопительного элемента и преобразователя:

$$\eta_{\text{действ}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}}}. \quad (5)$$

Для уже упомянутого емкостного неуправляемого накопителя энергии ЕНЭ, образец которого испытывался на тяговой подстанции московского метрополитена [6], значения возможного и действительного КПД совпадают, поскольку преобразовательный элемент у него отсутствует:

$$\eta_{\text{возм}}^{\text{снэ}} = \eta_{\text{действ}}^{\text{снэ}} \sim 0,95.$$

Большое значение действительного КПД неуправляемого емкостного накопителя энергии объясняется двумя факторами: а) отсутствием преобразователя энергии; б) малой долей использования полного объема энергоемкости, из которой в работе на прием и выдачу энергии избыточной рекуперации участвует максимум 5–10 процентов. Другими словами, неуправляемые накопители энергии недоиспользуют свою энергоемкость, что служит одним из главных их недостатков, при этом обеспечивая высокий КПД, что является преимуществом при работе в КС ГЭТ.

Реальный КПД системы накопления энергии для ГЭТ

Однако основной функциональный набор СНЭ при эксплуатации в контактной сети дополняется другими функциями, необходимыми для реальной работы устройства. Например, следует упомянуть такие подсистемы собственных нужд накопительного устройства, как система мониторинга основных параметров накопительных элементов, система климат-контроля с охлаждающими/нагревательными элементами, система управления, питание драйверов транзисторов и др., которые потребляют энергию из КС. Эта энергия расходуется безвозвратно и непосредственно в выполнении работы СНЭ не участвует. Указанные затраты энергии производятся постоянно во все время работы накопителя

энергии, в т. ч. и в периоды, когда прием или выдача энергии отсутствуют – т. е. в периоды хранения.

Само накопительное устройство довольно редко устанавливается непосредственно в контактную сеть. Так, в схеме подключения бортового накопителя может присутствовать сглаживающий фильтр, преобразователь собственных нужд, питающий системы собственных нужд накопительного устройства. Кроме того, в каждом накопительном устройстве реализована функция климат-контроля, например в виде воздушных или жидкостных охлаждающих систем, которые потребляют энергию другого напряжения, чем силовой контур накопителя. Возможны и другие управляющие и исполнительные устройства, потребляющие энергию для обеспечения основного процесса по запасанию и выдаче энергии.

Способ определения этих затрат может быть реализован как инструментально (установить счетчик энергии на входе этих энергопотребляющих систем), так и аналитически. Последнее также довольно просто устанавливается, если известна средняя мощность потребления указанных систем и время работы СНЭ, например за рабочий день, месяц, год и т. д. Поскольку эти потери условно постоянны, а выработка накопителя энергии может меняться в связи с дорожной обстановкой, сезоном и др. внешними факторами в КС ГЭТ, то доля потерь на собственные нужды в общей структуре потерь энергии в СНЭ может существенно меняться и при этом абсолютное значение потерь может меняться не столь значительно, и наоборот.

Сумма реальных затрат энергии на обеспечение работы накопителя ($E_{\text{обесп}}$) и запасенной для хранения в накопителе энергии ($E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}}$) есть величина общего реального потребления энергии СНЭ ($E_{\text{реал}}$):

$$E_{\text{реал}} = E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}}. \quad (6)$$

Формула действительного КПД (5) с учетом дополнительных затрат энергии на обеспечение работы накопителя (6) модифицируется в формулу реального КПД:

$$\eta_{\text{реал}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{реал}}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}}}. \quad (7)$$

Наилучшим способом определения доли и абсолютного объема потерь накопителя является его длительная работа в реальных условиях, когда можно определить двунаправленным счетчиком объемы всей входной и выданной энергии, отношение которых и определяет реальное КПД такого устройства по формуле (7). Для бортового накопителя энергии с учетом двух цепей питания – силовой и управляющей – инструментально определить значение $E_{\text{реал}}$ труднее, т. к. эти цепи питаются разным напряжением и необходимо устанавливать два счетчика энергии. Реализация наилучшего способа представляется следующим образом: накопительный агрегат со всеми системами собственных нужд имеет только один ввод энергии, по которому и осуществляется ее подвод для силовой цепи и для цепей управления-контроля и вывод для силовой цепи. Например, стационарный буферный накопитель энергии НКЭ-3Г устроен именно таким образом, поскольку питание собственных нужд агрегата осуществляется при помощи статического преобразователя, подключенного к вводу контактной сети после счетчика энергии.

Что касается упомянутого неуправляемого емкостного накопителя ЕНЭ, работавшего на ТП московского метро, то реальные расходы собственных нужд оказались существенно ниже, чем ожидалось при планировании этих испытаний. Ожидались существенные расходы на вентиляцию накопительных модулей, однако тепловые потери конденсаторных модулей оказались незначительными в силу малого использования полной энергоемкости, и вентиляторы практически не включались. Таким образом, все затраты на собственные нужды свелись к питанию сигнальных диодных ламп на панелях, микрочипов в модулях диагностики и передачи сигналов, а также к питанию общего компьютера. Итоговая нагрузка собственных нужд составила максимум 0,6 кВт на всю систему, расход энергии не превышал в сутки 15 кВт·час.

Фактический КПД накопителей в контактной сети ГЭТ

Однако перечисленные в формуле (6) потери и расход энергии для СНЭ не исчерпывают все энергозатраты таких агрегатов. Для накопителя бортового исполнения прибавляется еще один дополнительный источник потерь энергии, вызванный необходимостью постоянной перевозки этого устройства во все время работы вагона, на котором он установлен ($E_{\text{трансп}}$). С учетом этого элемента затрат перечислены все фактические потери и затраты энергии у накопителя:

$$E_{\text{факт}} = E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}} + E_{\text{трансп}} \cdot \quad (8)$$

С учетом затрат энергии на транспортировку (8) реальный КПД (7) модифицируется в формулу фактического КПД:

$$\eta_{\text{факт}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{факт}}} = \frac{E_{\text{выд}}^{\text{нэ-преобр}}}{E_{\text{зап}}^{\text{нэ-преобр}} + E_{\text{обесп}} + E_{\text{трансп}}} \cdot \quad (9)$$

Отметим, что для стационарного накопителя энергии любого типа значение $E_{\text{трансп}}$ равно нулю, т. к. он не перевозится, и формула (9) совпадает с формулой (7). Для бортового накопителя энергии все составляющие формул (8) и (9) – ненулевые.

Сравнение фактического КПД стационарного и бортового накопителей энергии показывает, что при условии равенства основных характеристик (энергоемкости, мощности, потерь в накопительном элементе и в преобразователе, а также затрат энергии на системы собственных нужд) эффективность бортового накопителя всегда будет ниже, чем у стационарного:

$$\eta_{\text{факт}}^{\text{стационар}} > \eta_{\text{факт}}^{\text{бортов}} \cdot \quad (10)$$

что очевидно, поскольку фактические затраты энергии у такого бортового накопителя всегда будут больше на энергозатраты для его перевозки $E_{\text{трансп}}$.

Определение фактического КПД ($\eta_{\text{факт}}$) накопителя энергии бортового и стационарного исполнения является одной из базовых задач проведения их испытаний в условиях опытной эксплуатации.

Экспериментальные исследования фактического КПД накопителей

В последние годы в городском электротранспорте России были проведены опытные эксплуатации следующих типов буферных накопителей энергии: суперконденсаторный бортовой (АО «Синара-Транспортные машины» – ООО «Чергос», трамвай), емкостной стационарный (ЗАО «Элтон», метрополитен), маховичный стационарный (ООО «Кинемак», трамвай). На основании име-

ющихся данных о проведенных испытаниях появилась возможность оценить эффективность работы перечисленных типов агрегатов.

КПД бортового суперконденсаторного накопителя без межпоездного обмена

Суперконденсаторный накопитель (СКН) был установлен на борту трамвайного вагона на крыше. Электрическая схема работы накопителя обеспечивала прием всей доступной энергии при рекуперативном торможении вагона, не позволяя выдавать полезную энергию рекуперации в контактную сеть. Выдача энергии производилась при разгоне вагона на тяговые преобразователи тележек.

В материалах научно-технического совета Международной ассоциации предприятий городского электротранспорта (МАП ГЭТ) [9] приведен показатель действительного КПД данного СКН $\eta_{\text{действ}}^{\text{СКН}} = 0,684$ (т. е. без учета потребления собственных нужд накопительного устройства и затрат энергии на его перевозку).

Так как данные по потреблению систем собственных нужд суперконденсаторного блока и блока управления не приводятся, то оценим этот показатель условно по аналогии с близкими по функционалу устройствами (преобразователи инверторные и блоки суперконденсаторов). Так, среднечасовая мощность потребления всех систем, работающих на обеспечение функционирования суперконденсаторного накопителя мощностью 100 кВт, состоит из мощности работы: питающих эти устройства бортовых статических преобразователей энергии, систем управления СКН (накопительного элемента и частотного преобразователя), систем климат-контроля и охлаждения, а также некоторых иных и не может для агрегата такой мощности быть менее 2–3 кВт (2–3 %). Примем среднее значение 2,5 кВт. За 17-часовой рабочий день вагона на обеспечение работы одного бортового накопителя энергии ($E_{\text{обесп}}^{\text{СКН}}$) будет израсходовано из контактной сети порядка 42,5 кВт·час.

Поскольку как балластный груз бортовой СКН добавляется к массе тары вагона, то для расчета потерь по статье затрат на перевозку ($E_{\text{трансп}}^{\text{СКН}}$) может применяться типовая отраслевая методика расчета энергопотребления вагоном (см., например, [10]). В таких методиках для каждого типа подвижной единицы рассчитывается свой коэффициент потерь на сопротивление движению вагона, в котором учитывается масса и пробег тары (см., например, таблицу 2.1 в Приложении 2 в [10]). Поскольку для каждой единицы ЭПС известен ее пробег (за сутки, месяц, год) и для накопителя известна его масса, то расчет транспортных потерь энергии на перевозку бортового накопителя ($E_{\text{трансп}}^{\text{СКН}}$) делается просто. Например, для трамвайного вагона типа 71-631 технологические нормы расхода электроэнергии на электротягу составляют 85 кВт·час/1000 ткм при базовой средней эксплуатационной скорости $V_{\text{зо}} = 15$ км/ч [10]. При установке бортового суперконденсаторного накопителя массой в 1 тонну на такой вагон объем затрат энергии на тягу для его перевозки за день, когда суточный пробег вагона равен 200 км (т. е. за сутки показатель перевозки такого бортового накопителя равен 200 ткм), составляет $E_{\text{трансп}}^{\text{СКН}} = 17$ кВт·час. С учетом показателей в [10], средней массы вагона 32,5 т и пробега 200 км в день, а также коэффициента потерь при

тяге в 1,4 и вышеприведенного $\eta_{\text{действ}}^{\text{СКН}}$, фактический КПД суперконденсаторного бортового накопителя энергии составит

$$\eta_{\text{факт}}^{\text{СКН}} = 0,594 . \quad (11)$$

В год затраты энергии только на перевозку одной такой суперконденсаторной СНЭ при условии ежедневной равной транспортной работы вагона будут равны 6205 кВт·час, а на собственные нужды СКН – 15512 кВт·час. Причем эти годовые затраты энергии на обеспечение работы и перевозку СКН суммарно в объеме 21717 кВт·час будут производиться не из возвращенной на полезную работу избыточной рекуперации вагона, а из контактной сети, т. е. от тяговой подстанции.

КПД бортового суперконденсаторного накопителя с межпоездным обменом

Также в нашей стране были произведены теоретические расчеты бортового суперконденсаторного накопителя энергии, который отличается от предыдущей конструкции тем, что позволяет производить межпоездной обмен рекуперированной при торможении вагона энергией, а энергию избыточной рекуперации запасает, хранит до возникновения тягового энергопотребления своего вагона и выдает на его тягу при появлении такой возможности [11]. На основе построения такой теории был сделан опытный образец указанного накопителя и проведены его тестовые испытания там же, в СПб горэлектротранспорте на трамвайном вагоне. Касательно энергоемкости такого накопителя следует отметить, что она совпадала с энергоемкостью накопителя для варианта с отсутствием прямого межпоездного обмена энергией рекуперации (МПО), поскольку последняя является явлением случайным и накопитель для полной утилизации избыточной рекуперации должен иметь возможность принять в себя всю энергию рекуперативного торможения при отсутствии потенциала межпоездных перетоков энергии рекуперации. В расчетах такого буферного бортового накопителя была указана его полная энергоемкость – 5,7 МДж [там же], что близко к значению емкости суперконденсаторного накопителя для варианта его работы без возможности межпоездного обмена. Последнее означает, что габариты и масса обоих вариантов суперконденсаторных бортовых накопителей будут практически идентичными.

Поскольку все остальные условия работы подвижного состава в этих случаях одинаковы, то расчет значений типов КПД для процессов возврата энергии рекуперации при использовании бортового суперконденсаторного накопителя, разрешающего межпоездной обмен полезной рекуперацией, рассчитывается по аналогии с вариантом для бортового накопителя без наличия такой возможности.

Согласно расчетам в [11], объем полезной энергии рекуперации, ушедшей в КС по межпоездному обмену, составляет порядка 30 процентов от объема затраченной на тягу вагона потребленной энергии. Объем избыточной рекуперации составил порядка 33 % от потребления на тягу. Состав оборудования суперконденсаторного накопителя с возможностью межпоездного обмена полезной энергии рекуперации – такой же, как и в выше рассмотренном варианте без такой возможности. Особенностью же является возможность обеспечения межпоездных перетоков рекуперации, что определяет только меньший, практически вдвое, абсолютный объем энергии. Однако абсолютные объемы преобразуемой энергии рекуперации в процессе определения характеристик самого рассматриваемого оборудования не участвуют, нам важны только характеристики самого оборудования. А эти характеристики определяются соответствующими показателями

подсистем: накопительных элементов и преобразователей, а также системы управления и контроля накопителя.

Поскольку все подсистемы – идентичные, то мы можем заключить, что все четыре показателя эффективности бортового суперконденсаторного накопителя с возможностью реализации межпоездного обмена полезной рекуперацией (возможный, действительный, реальный и фактический КПД) будут такими же, что и у накопителя без наличия такой возможности.

КПД стационарного маховичного накопителя

Маховичный буферный накопитель энергии типа НКЭ-3Г подключается непосредственно к контактной сети ГЭТ и имеет счетчик входной и выходной энергии (рис. 2). При этом счетчик энергии установлен на единственном входе контактной сети в цепи питания всех подсистем до сетевого рубильника. Испытания агрегата проводились в трамвайных системах городов Коломна и Санкт-Петербург, общая наработка устройства превысила 5500 моточасов.



Рис. 2. Маховичный накопитель энергии НКЭ-3Г и его шкаф управления с двунаправленным счетчиком энергии СКВТ-Ф610

То есть такая схема учета позволила определить реальный (то же самое для стационарных – фактический) КПД агрегата. Длительная, в течение практически года, его эксплуатация в КС ГЭТ показала следующие результаты: среднесуточный реальный КПД агрегата зимой, когда, казалось бы, возникают лучшие условия для охлаждения греющихся частей агрегата, снижается до 59–60 %, а летом поднимается до 65–66 %. Также весьма велики колебания реального КПД внутри суток (рис. 3). Такие изменения реального КПД для стационарных накопителей ($\eta_{\text{реал}}^{\text{стационар}}$) объясняются тем, что в зимний период в связи с наличием в КС значительной нетяговой нагрузки практически все время осуществления транспортной работы подвижным составом объем избыточной энергии рекуперации вагонов

снижается и буферный накопитель энергии работает на прием избыточной рекуперации меньше, чем в теплый сезон, когда нетяговая нагрузка в сети резко снижается. В теплое время года нетяговая нагрузка в КС горэлектротранспорта имеет значительно меньшую мощность, количество избыточной рекуперации существенно растет, увеличивается и число событий выдачи избыточной рекуперации. Тем самым хотя и увеличиваются потери энергии в переходных процессах в накопителе (во время зарядки и разрядки), однако быстрее вырастает общий объем выданной и также принятой энергии и снижается продолжительность периодов хранения энергии на выбеге.

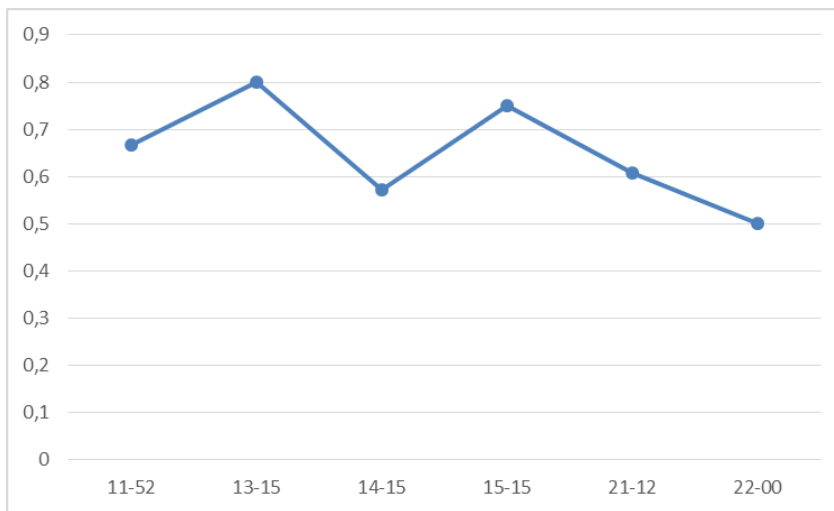


Рис. 3. График значений реального КПД маховичного накопителя энергии НКЭ-3Г $\eta_{\text{реал}}^{\text{НКЭ}}$, вычисленных по результатам замеров входной и выходной энергии двунаправленным счетчиком в течение одного дня по часовым интервалам (на оси абсцисс указано время начала замера часового интервала). Данные получены с применением двунаправленного счетчика постоянного тока типа СКВТ-Ф610, широко применяемого в ГЭТ России

КПД стационарного неуправляемого емкостного накопителя

Согласно данным испытаний стационарного неуправляемого емкостного накопителя энергии на тяговой подстанции Т-23 московского метрополитена значение среднего действительного КПД составило порядка 0,955 [6]. Величина была получена путем прямого измерения входящей и выходящей энергии за длительный, в несколько месяцев, период испытаний.

Потребление энергии на собственные нужды ЕНЭ производилось системой внутренней вентиляции модулей, системой диагностики накопительных элементов, системой управления и др. В соответствии с техническим заданием на накопитель он должен затрачивать на свое функционирование не более 3 % от мощности процессов возвращения в тяговую сеть ранее запасенной энергии избыточной рекуперации. При этом следует учитывать, что мощность собственных нужд затрачивается постоянно во все время подключения накопителя к сети.

Средняя мощность разряда устройства составляла до 300 кВт. Средняя мощность собственных нужд составляла до 0,6 кВт. Следовательно, на собственные

нужды устройства за один день потреблялось не более 15 кВт·час электроэнергии.

С учетом гораздо большего объема энергии рекуперации (в данном случае – только избыточной рекуперации) в тяговой сети метрополитена в сравнении с тяговой сетью трамвайного движения фактический (он же равен реальному) КПД емкостного накопителя энергии, исходя из вышеприведенного значения действительного КПД ($\eta_{\text{действ}}^{\text{ЕНЭ}}$) и затрат энергии на собственные нужды, должен иметь значение $\eta_{\text{факт}}^{\text{ЕНЭ}} \approx 0,94$. Высокое значение эффективности для неуправляемого ЕНЭ может быть объяснено тем, что у него отсутствуют двойные потери в преобразователе энергии, которого у него нет. К недостаткам неуправляемого емкостного накопителя энергии следует отнести то, что у него гораздо меньший полезный (рабочий) объем энергоемкости от общей емкости накопительных элементов, чем у управляемых накопителей (до 10 % против 96–98 % соответственно). Это означает, что большая часть энергоемкости не участвует в полезной работе неуправляемого ЕНЭ.

В сводной таблице представлены коэффициенты полезного действия накопителей энергии, проанализированных в настоящем исследовании.

Коэффициенты полезного действия накопителей энергии, испытанных в российском городском электротранспорте

Тип накопителя	Место размещения	$\eta_{\text{возм}}$	$\eta_{\text{действ}}$	$\eta_{\text{реал}}$	$\eta_{\text{факт}}$
СКН без МПО	Борт трамвая	0,98	0,684	нд	0,594
СКН с МПО	Борт трамвая	0,98	0,684	нд	0,594
ЕНЭ	КС метро	0,95	0,95	0,94	0,94
НКЭ-3Г	КС трамвая	0,95–0,98	нд	0,63	0,63

Полученные данные в ходе практической эксплуатации и теоретических расчетов на их основе показывают, что все варианты исполнения бортовых суперконденсаторных накопителей энергии имеют существенно меньшие показатели коэффициентов полезного действия, определенных для полной системы накопителя, нежели КПД стационарных буферных накопительных агрегатов емкостного и маховичного типов.

Выводы

Системы накопления энергии в зависимости от состава оборудования могут иметь показатели коэффициентов полезного действия в зависимости от полноты их рассмотрения: возможный (только накопительный элемент), действительный (накопительный элемент и преобразователь), реальный (дополнительно учитываются расходы на собственные нужды СНЭ) и фактический (дополнительно учитывается расход энергии на перевозку накопителя).

Фактический КПД накопительного агрегата для сетей ГЭТ учитывает потери в силовом цикле, затраты энергии на работу систем собственных нужд, а также на перевозку устройства (в случае бортового исполнения).

У накопителей бортового исполнения ко всем прочим потерям энергии в ходе их функционирования добавляются затраты сетевой энергии, необходимые для их перевозки в качестве балластного груза.

У стационарных накопителей затраты энергии на перевозку отсутствуют.

Неуправляемые накопители энергии имеют более высокий фактический КПД в силу отсутствия в конструкции инверторных преобразователей.

Отношение полезного рабочего объема накопителя к его полной энергоемкости выше у управляемых накопителей энергии.

Определение указанных видов КПД для накопителя энергии в ГЭТ является одной из главных задач при его опытной эксплуатации.

Полученные результаты исследования позволяют сделать вывод, что его цель достигнута, выведены формулы и принципы расчета всех видов коэффициентов полезного действия накопителей энергии, начиная от рассмотрения только лишь этих коэффициентов для накопительных элементов этих устройств без учета других видов потерь и затрат энергии в процессе их работы и заканчивая знанием КПД с полным учетом всех затрат и потерь. В качестве примеров определения этих коэффициентов привлечены данные по фактически испытанным в ГЭТ России накопительным устройствам стационарного и бортового исполнения, управляемых и неуправляемых.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Радченко Р.В., Тюльпа В.В.* Термодинамический анализ эффективности использования суперконденсаторов в накопителях энергии // Электроприводы переменного тока: Материалы 17-й международной научно-технической конференции. 2018. С. 64–66.
2. *Деньщиков К.К., Жук А.З.* Гибридный накопитель электроэнергии на базе аккумуляторов и суперконденсаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teenfor.org/upload/files/0513ec7730984747969d9bb8041d441b.pdf> 21.07.2022.
3. *Деньщиков К.К., Жук А.З.* Гибридный накопитель электроэнергии мегаваттного диапазона // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность, 2016: Материалы Международного конгресса REENCON-XXI «Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность», Сколково, 13–14 октября 2016 года / Под ред. *Д.О. Дуникова, О.С. Попеля.* Сколково: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Объединенный институт высоких температур Российской академии наук», 2016. С. 129–135.
4. *Деньщиков К.К., Жук А.З., Фортос В.Е., Шейндлин А.Е.* Гибридный накопитель электроэнергии // Энергия: экономика, техника, экология. 2015. № 2. С. 2–10.
5. *Бердников Р.Н., Фортос В.Е., Сон Э.Е.* [и др.] Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. № 2(7). С. 40–51.
6. *Баранов Л.А., Гречишников В.А., Еришов А.В., Родионов М.Д., Шевлюгин М.В.* Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена // Электротехника. 2014. № 8. С. 18–21.
7. *Гуля Н.В.* Маховичные двигатели. М., Машиностроение. 1976. 46 с.
8. *Гуля Н.В.* Инерционные аккумуляторы энергии. Изд. 2-е, стереотип. М.: ЛЕНАНД. 2021. 240 с.
9. *Чернигов В.М.* Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (Дата обращения 22.07.2022).
10. Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего пользования. Приложение к распоряжению Минтранса России от 18 апреля 2013 г. № НА-37-р.
11. *Шаряков В.А., Шарякова О.Л., Агунов А.В., Третьяков А.В.* Возможности рационального использования энергии торможения электрического подвижного состава // Электротехника. 2018. № 10. С. 55–59.

Статья поступила в редакцию 21 августа 2022 г.

EFFICIENCY COEFFICIENTS OF THE ENERGY STORAGE DEVICE IN THE CONTACT NETWORK OF THE CITY ELECTRIC TRANSPORT

*A.V. Katsay*¹, *M.V. Shevlyugin*²

¹ Kinemak LLC,

13 Kashirsky Proezd, Moscow, 115201, Russian Federation

² Russian University of Transport

9, Obraztsova str., Moscow, 127994, Russian Federation

E-mail: proton764@mail.ru, mx_sh@mail.ru

Abstract. *The efficiency of stationary and on-board energy storage devices in the contact network of mountain electric transport (tram, metro) is considered. The efficiency coefficients of storage devices are derived depending on the completeness of consideration of storage systems and methods of their application. In accordance with the established formulas for calculating different types of efficiency, the operation indicators of domestic energy storage devices of various types on mountain electric transport are analyzed. It has been established that, other things being equal, stationary energy storage devices are more efficient than those of the on-board version.*

Keywords: *energy storage, accumulating element, converter, efficiency, energy losses, efficiency types, GET contact network, recovery, on-board and stationary applications.*

REFERENCES

1. *Radchenko R.V., Tulpa V.V.* Thermodynamic analysis of the efficiency of using supercapacitors in energy storage // AC electric drives 2018. Pp. 64–66.
2. *Denshchikov K.K., Zhuk A.Z.* Hybrid electric power storage based on batteries and supercapacitors. <http://reenfor.org/upload/files/0513ec7730984747969d9bb8041d441b.pdf> 21.07.2022
3. *Denshchikov K.K., Zhuk A.Z.* Hybrid electric power storage of megawatt range // Renewable energy XXI century: Energy and Economic Efficiency, 2016: Proceedings of the International Congress REENCON-XXI "Renewable Energy XXI century: Energy and economic efficiency", Skolkovo, October 13-14, 2016 / Edited by *D.O. Dunikov, O.S. Popel*. Skolkovo: Federal State Budgetary Institution of Science United Institute of High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, 2016. Pp. 129–135.
4. *Denshchikov K.K., Zhuk A.Z., Fortov V.E., Sheindlin A.E.* Hybrid electric power storage // Energy: economics, technology, ecology. 2015. No. 2. Pp. 2–10.
5. *Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E.* [et al.] Hybrid electric power storage for UNES based on batteries and supercapacitors // Energy of the unified grid. 2013. № 2(7). Pp. 40–51.
6. *Baranov L.A., Grechishnikov V.A., Ershov A.V., Rodionov M.D., Shevlyugin M.V.* Performance indicators of a stationary energy storage device at traction substations of the Moscow metro // Electrical Engineering. 2014. No. 8. Pp. 18–21.
7. *Gulia N.V.* Flywheel engines. M.: Mechanical Engineering. 1976. 46 p.
8. *Gulia N.V.* Inertial energy accumulators. 2nd edition, stereotype. M.: LENAND. 2021. 240 p.
9. *Chernihiv In.M.* Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device. http://mapget.ru/wp-content/uploads/2021/12/MAPGET_NTS_Chergos.pdf (Access to the resource 22.07.2022).
10. Methodological recommendations for calculating the economically reasonable cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban traffic by road and urban ground electric public transport. Appendix to the Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. NA-37-r dated April 18, 2013.

¹ *Alexander V. Katsay, General Director.*

² *Maxim V. Shevlyugin, (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor*

11. *Sharikov V.A., Sharkova O.L., Agunov A.V., Tretyakov A.V.* Possibilities of rational use of braking energy of electric rolling stock // *Electrical engineering*. 2018. No. 10. Pp. 55–59.