

*А. В. Кацай, В. А. Зубакин*

## СТОИМОСТНОЙ АНАЛИЗ РЕКУПЕРАТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

**Аннотация.** В исследовании рассмотрены стоимостные аспекты процессов рекуперации электроэнергии в электротранспорте и её повторного использования на полезную перевозочную работу. Закупочная стоимость рекуперированной энергии равна нулю. Рекуперативное торможение не вызывает дополнительного износа элементов систем тяги вагонов. В силу этого направляемая на повторное полезное использование рекуперативная энергия имеет нулевую себестоимость. С применением бортовых или стационарных накопителей избыточная часть энергии рекуперации может быть перенаправлена на повторную полезную работу. Поскольку КПД любых накопителей не превышает 64–68 %, то потери от полной энергии рекуперации в бортовых накопителях превышают треть от её объёма. Помимо этого, из сети дополнительно потребляется энергия на собственные нужды и перевозку бортовых накопителей. Стационарные накопители не перевозятся, полностью сохраняют полезные сетевые перетоки рекуперации, обеспечивают непосредственное потребление её сетевой нагрузкой в ходе зарядки и выдают запасённую её часть в сеть после хранения. В сравнении с отсутствием накопителей любого типа бортовые устройства приводят к увеличению оплачиваемого энергопотребления ГЭТ, а стационарные – существенно его уменьшают.

**Ключевые слова:** источники энергии, контактная сеть, полезная и избыточная энергии рекуперативного торможения, стационарный и бортовой накопитель, перенаправление избыточной рекуперации, стоимостная форма, затраты, оплачиваемая энергия, тарифы.

**Для цитирования:** Кацай, А. В. Стоимостной анализ рекуперативной энергии городского электротранспорта / А. В. Кацай, В. А. Зубакин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2. – С. 57–72. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_57.

### **Введение**

За выделенный период (например, за день) электротранспортное предприятие осуществляет определённый объём транспортной работы по перевозке пассажиров –  $A_{т.п.}$ , которая отражается в таких показателях, как количество перевезённых пассажиров, выполненный пробег в тонно-километрах, штатная работа бортового и стационарного оборудования в моточасах, труд персонала в человеко-часах и др. Для обеспечения множества проводимых работ были произведены затраты (в которые входят: работа рабочей силы, расход материалов, износ инструмента и оснастки, а также основных средств, включая стационарное оборудование, здания, контактную сеть, тяговые подстанции, подвижной состав и т.д.). В этот список также входит обеспечение оборудования электрической энергией. Энергия расходуется на работу подвижного состава (ПС) и оборудования стационарной транспортной инфраструктуры, подключённой к системе тягового энергоснабжения постоянного тока (СТЭ), а также на производственные нужды депо и для осуществления административно-управленческой деятельности (собственные нужды предприятия на стороне переменного тока). В настоящем исследовании мы рассматриваем в качестве объекта СТЭ постоянного тока, которая питает энергопотребляющее оборудование ПС и стационарного электрооборудования, подключённого к контактной сети (КС), поскольку именно по стороне постоянного тока расходуется 90 и более процентов общего объёма потребляемой энергии в таком предприятии. Предметом исследования являются качественные и количественные стоимостные характеристики оборота возвращаемой на повторное использование электроэнергии (рекуперированной), в том числе её превращений, при выполнении транспортной работы в СТЭ. В исследовании используются методы энергетического баланса, стоимостного анализа товарной формы и статистического анализа.

**Основная часть***Баланс энергии в контактной сети электротранспорта*

Для выполнения транспортной работы указанным оборудованием на стороне постоянного тока затрачивается электрическая энергия в объёме  $E_{т.р.}$ . То есть выполненная транспортная работа  $A_{т.р.}$  включает в себя затраченную на работу оборудования электрическую энергию  $E_{т.р.}$ , причём последняя включает энергию, потреблённую тяговыми приводами подвижного состава ( $E_{тяги}$ ), а также нетяговым бортовым оборудованием ( $E_{нетяги\_борт}$ ) и стационарным сетевым оборудованием ( $E_{нетяги\_стац}$ ):

$$A_{т.р.} \leftarrow E_{т.р.} = E_{тяги} + E_{нетяги\_борт} + E_{нетяги\_стац}, \quad (1)$$

где стрелкой обозначено включение потреблённой электроэнергии в состав выполненной транспортной работы как её необходимый момент.

С целью обеспечения баланса источников и потребителей энергии [1], используемой для выполнения работы  $A_{т.р.}$  перечисленного оборудования, объём электроэнергии  $E_{т.р.}$  берётся от источников энергии, которые питают СТЭ. В современной электротранспортной системе в число источников энергии СТЭ входят первичные энергоисточники в виде тяговых выпрямительных подстанций, а также вторичные энергоисточники – тяговые приводы вагонов, выдающие в КС рекуперированную энергию (преобразуемую из механической в электрическую) в ходе торможения. Из общего объёма механической энергии линейного движения, преобразуемой в ходе торможения в электроэнергию ( $E_{рек}$ ), часть рекуперированной энергии выдаётся в сеть ( $E_{рек\_полезн}$ ) на имеющуюся там одновременно с этим процессом тяговую и нетяговую нагрузку ( $E_{тяги}$  и  $E_{нетяги}$ ), а другая часть, обычно называемая избыточной энергией рекуперации ( $E_{рек\_избыт}$ ), при отсутствии одновременной достаточной нагрузки направляется на тормозные резисторы своего вагона, где рассеивается теплом в атмосферу ( $E_{резист}$ ). Избыточная рекуперация  $E_{рек\_избыт}$  не уходит в сеть, т.е. не участвует в выполнении транспортной работы другими присоединёнными в КС энергопотребителями, однако выполняет полезную функцию в силовой электрической цепи вагона и в общем уравнении электробаланса источников и потребителей СТЭ за определённый период эта часть электроэнергии также присутствует:

$$E_{ТП} + E_{рек\_полезн} + E_{рек\_избыт} = E_{тяги} + E_{нетяги\_борт} + E_{нетяги\_стац} + E_{резист}, \quad (2)$$

где ( $E_{ТП}$ ) – энергия, выдаваемая в КС постоянного тока от первичных энергоисточников – тяговых понижающих подстанций системы. Потери энергии при работе оборудования ПС, стационарной нагрузки и КС (т.н. технологическое потребление) для простоты изложения учтены в этой формуле в составе нетяговой нагрузки. Более подробно о потерях энергии см., например, в [17].

Левая часть уравнения энергобаланса – источники энергии – имеет только одно составляющее, которое требует оплаты –  $E_{ТП}$ , за которую денежные средства перечисляются энергоснабжающей организации, поставившей эту часть энергии. В реальности расчёт потребителя с энергопоставщиком осуществляется как за поставленную электроэнергию, так и за поставленную максимальную пиковую мощность. Для упрощения оценки затрат на энергоресурсы многими энергопоставщиками и потребителями производится сведение сложносоставной оплаты за энергоресурсы по энергии и по мощности к т.н. «котловому» тарифу, значение которого получается делением суммы выставленных счетов за энергию и за мощность на объём потреблённой энергии. Далее в исследовании мы будем рассматривать стоимостные показатели энергии рекуперации именно с использованием «котлового» тарифа. За две другие части суммарного объёма выдаваемой другими источниками на выполнение транспортной работы энергии ( $E_{рек\_полезн}$  и  $E_{рек\_избыт}$ ) оплата никому не осуществляется, т.к. эта электроэнергия

ранее уже была закуплена и теперь используется во второй раз как возобновляемый отход производства. Точнее, она является возобновлённой электроэнергией, вошедшей в технологическое обращение в первый раз от первичного энергоисточника, затем превращённая тяговым приводом в форму механического линейного движения вагона и вращения колёс, после чего этими же тяговыми приводами в генераторном режиме при торможении превращённая во второй раз обратно в форму электроэнергии (т. е. рекуперированная). Другими словами, рекуперативная энергия торможения подвижного состава городского электротранспорта является возобновлённой электроэнергией, прошедшей полный цикл превращений из электроэнергии в механическую и из этой последней снова в электрическую в ходе её использования, а тяговый электропривод рекуперативно тормозящего вагона является источником возобновляемой энергии, поскольку работу по превращению её форм выполняют они. Таким образом, предприятия городского электротранспорта фактически производят для собственного потребления возобновляемую электроэнергию, которая, в сравнении со всеми прочими имеющимися технологиями производства возобновляемой энергии, имеет полный (замкнутый) цикл возобновления и, как будет показано далее, является наиболее технологически и экономически эффективной из них.

По данным многих исследований процессов рекуперации в ГЭТ [2–4] общий объём восстановленной из механического движения электроэнергии может равняться до половины от потребляемой на тягу энергии или до четверти от всего объёма энергопотребления  $E_{м.р.}$  в СТЭ на выполнение транспортной работы:

$$E_{рек} = E_{рек\_полезн} + E_{рек\_избыт} \approx 0,5 * E_{тяги} \approx 0,25 * E_{м.р.} \quad (3)$$

#### *Полезная работа избыточной рекуперации*

Избыточная рекуперация производится современной тяговой системой с частотными транзисторными системами управления тягой (ТрСУ) вагона в таком же порядке, какой был и на предыдущем технологическом уровне развития подвижного состава ГЭТ, когда он принципиально не имел вовсе возможности выдавать рекуперированную электроэнергию на повторное полезное использование. Новый технический уровень тяговых приводов с применением транзисторно-инверторных преобразователей для управления тяговыми двигателями более эффективно выполняет ту же функцию по обеспечению снижения количества механической энергии движущегося вагона за счёт преобразования её в электрическую, но с перенаправлением части её в КС, где эта энергия потребляется другим сетевым оборудованием на выполнение им в этот период своей части транспортной работы. Это перенаправление возможно только при одновременном с рекуперативным торможением одного вагона присутствии в сети нагрузки, имеющей мощность потребления не ниже, чем мощность рекуперации. При отсутствии в сети такой нагрузочной мощности на клеммах тягового привода повышается напряжение и, по достижении его значения уровня отсечки (уставки) тормозного прерывателя, эта энергия переходит в цепь утилизации её на тормозных резисторах.

При этом способе утилизации рекуперативной энергии в контактную сеть в процессе выполнения полезной транспортной работы на этапе торможения вагона у тяговой системы с ТрСУ появляется новая функциональная составляющая к имеющейся у реостатно-контакторных систем управления тягой (РКСУ) – помимо обеспечения бортовой нагрузки для производимой энергии рекуперации обеспечить канал перенаправления её в КС на сетевую нагрузку. Реализация её не требует никаких иных технологических устройств в дополнение к тем, которые уже имеются у частотного привода для обеспечения избыточной утилизации рекуперативной энергии на тормозных резисторах, поскольку главное звено в этом алгоритме – работа тормозного прерывателя – силового транзистора, который может только либо присоединить нагрузку в виде бортовых тормозных резисторов к цепи перетока рекуперировавшейся энергии у тормозящего вагона, либо не присоединить. Так, тормозной прерыватель не замыкается на эту цепь с тормозным резистором в случае работы тягового электродвигателя на разгон вагона, а замыкается только в случае, как показано выше, когда в КС нет достаточной по мощности нагрузки для приёма энергии рекуперации при торможении вагона. В случае же направления энергии рекуперации в КС, когда там имеется достаточная по мощности нагрузка, тормозной прерыватель также не замыкает тормозной резистор на звено постоянного тока инвертора, как и в случае разгона вагона. Поскольку в период полезного рекуперативного торможения единственный элемент, регулирующий перетоки энергии рекуперации – тормозной прерыватель – не работает (остаётся разомкнутым в цепи с бортовым резистором), то он никак не использует свой ресурс срабатывания, т. е. не изнаши-

вается. Таким образом, рекуперированная энергия не содержит ни переменной стоимостной составляющей ( $C_{перем\_рек}$ ), затраченной на закупку этой энергии у стороннего поставщика, ни амортизационной составляющей затрат ( $C_{аморт\_рек}$ ), связанной с износом генерирующего оборудования, которое на электротранспорте является распределённым и состоит из тяговых двигателей множества вагонов:

$$C_{перем\_рек} = 0 \text{ и } C_{аморт\_рек} = 0. \quad (4)$$

Соответственно полная себестоимость полезной энергии рекуперации равна нулю.

Полезная энергия рекуперации позволяет оборудованию, – тяговому других вагонов и нетяговому своего и других вагонов, а также и стационарному, выполнять часть транспортной работы, приносящей новую стоимость транспортному предприятию. В системах с РКСУ, где весь подвижной состав не имеет тяговых частотных преобразователей, величина  $E_{рек\_полезн}$  равна нулю, следовательно, всё энергопотребление на выполнение транспортной работы, кроме обеспечения электрической нагрузки при торможении за счёт бортовых тормозных резисторов, осуществляется от первичных энергоисточников – тяговых подстанций (ТП). То есть весь указанный объём потребляемой на эту работу энергии является оплачиваемым энергопоставщику. А при наличии в СТЭ хотя бы одного вагона с ТрСУ появляется вторичный источник энергии – рекуперированные тяговые приводы, выдающие полезную часть рекуперации на выполняющую транспортную работу нагрузку других вагонов, стационарной инфраструктуры и своей нетяговой бортовой нагрузки. Благодаря этому в соответствии с (2) на аналогичный объём энергии снижается объём энергопотребления от первичного оплачиваемого энергоисточника. На предприятиях, на которых на смену вагонам с РКСУ приходят вагоны с ТрСУ, отмечают снижение потребления энергии от подстанций на 10–20 % и более. В ходе проведения длительных измерений энергопотребления СТЭ небольшой трамвайной системы с двумя десятками трамваев на линии нами было установлено, что в общем объёме энергопотребления в СТЭ на долю пяти ТП приходилось в 2021 г. 85 % энергии, а от рекуперированных вагонов выход полезной энергии в КС составил 15 % [6] или, в абсолютном выражении, 1,674 млн кВт·ч.

Физическим условием возможности замещения полезной рекуперативной энергией той, которая поступает в КС от тяговой подстанции, состоит в том, что напряжение от рекуперированных тяговых приводов выше, чем напряжение, формируемое тяговой подстанцией в точках присоединения нагрузки к КС.

Некоторые исследователи [5] ошибочно полагают, что избыточная энергия рекуперации ( $E_{рек\_избыт}$ ), утилизируемая тормозными бортовыми резисторами, не участвует в выполнении полезной транспортной работы. Однако это не так, поскольку потребление энергии тормозными резисторами обеспечивает процесс превращения механической энергии в электрическую с последующей утилизацией этой последней в виде рассеиваемого в атмосфере тепла и, следовательно, уменьшает механическую энергию вагона за счёт снижения скорости движения, что позволяет проводить штатное торможение вагонов перед остановками, обеспечивая нормальный режим движения в условиях отсутствия в КС достаточной потребляющей мощности для приёма по КС полезной части энергии рекуперации. Если не отправлять избыточную часть рекуперации на бортовые резисторы, то реализация электродинамического торможения была бы невозможной (электрической энергии рекуперации некуда деваться и в КС резко бы выросло напряжение, что негативно сказывается на электрооборудовании всех подключённых к ней электропотребляющих устройств) и вагоны с ТрСУ потребовали бы в таком случае применения пневматических тормозов для торможения.

Выдача полезной части рекуперации в КС при наличии там достаточной по мощности для приёма этой энергии нагрузки выполняет в ходе торможения вагона ту же самую функцию, что и бортовые тормозные резисторы – расход превращённой в электричество кинетической энергии линейного движения. То есть  $E_{рек\_полезн}$  выполняет две функции: снижения кинетической энергии линейного движения вагона путём превращения кинетической энергии в электрическую и электропитания в сети превращённой формой этой энергии другого оборудования для выполнения им полезной транспортной работы. А избыточная часть  $E_{рек\_избыт}$  выполняет лишь одну из перечисленных функций – только снижения кинетической энергии линейного движения вагона.

### Отрицательная стоимость полезной рекуперации

Стоимость электроэнергии, поставляемой энергопоставщиком, определяется тарифоформирующими государственными органами и включает следующие составляющие: фонды оплаты труда, износ оборудования электростанций, первичное топливо, износ сетевого хозяйства, услуги системного оператора и других субъектов рынка электроэнергии, инвестиционную составляющую на модернизацию и развитие энергосистемы, прибыль, налоги и т.д.

Снижение механической энергии линейного движения вагона с РКСУ при торможении электродинамическим способом с утилизацией избыточной рекуперации на бортовых тормозных резисторах вызывает известный износ системы тяги, что, наряду с износом в ходе тяги и выбега, вызывает известные амортизационные затраты транспортного предприятия на обновление этой категории основных средств – тягового привода. Появление возможности выдачи рекуперированной энергии в КС при внедрении ТрСУ, как было показано в (3), не вызывает дополнительного износа системы тяги, поскольку единственный новый активный при рекуперации элемент управления тягой (тормозной прерыватель) в период выдачи рекуперативной энергии в КС – не работает. Все остальные подсистемы тяговой системы работают в том же функционале, как они и работали без возможности выдачи энергии в КС, кроме тормозного резистора. Если в системах с РКСУ бортовой тормозной резистор всегда принимал энергию при рекуперативном торможении, то при выдаче рекуперации в сеть он не подключается к цепи и, соответственно, не изнашивается.

Аналогичное воздействие энергия полезной рекуперации оказывает и на элементы контактно-кабельной сети. Так, при питании только от ТП энергия проходит путь до сетевой нагрузки через фидерный кабель и через контактный провод на участке секции от ввода фидерного кабеля до точки питания нагрузки (рис. 1). При питании этой нагрузки полезной частью рекуперации происходит следующее. Если нагрузка находится на секции КС, на которой рекуперативно тормозит вагон, то эта энергия потребляется только внутри данного изолированного участка (внутрифидерные перетоки рекуперации) и в фидерный кабель не попадает, т.е. в этом случае износа фидерного кабеля не происходит. Если же часть нагрузки находится на другом изолированном участке данной ТП, то путь энергии будет следующим: с контактного провода своего участка на свой фидерный кабель, до сборной шины ТП и оттуда по другому фидерному кабелю до контактного провода той секции, где имеется потребляющая нагрузка и далее – до точки присоединения этой нагрузки. Таким образом, в этой конфигурации энергия проходит большее расстояние, чем при питании от ТП. В ходе вышеупомянутых исследований СТЭ в трамвайной системе, доля внутрифидерного потребления рекуперации составила за полный 2021 г. 64,3 % от всего объема полезной рекуперации, тогда как на межфидерные перетоки полезной рекуперации пришлось чуть более трети – 35,7 %. Это соотношение показывает, что объемы перетоков энергии по фидерным кабелям на объеме полезной рекуперации как минимум на треть ниже, чем при питании сетевой нагрузки таким же объемом энергии от тяговой подстанции. Из него следует прямой вывод – полезная сетевая рекуперация резко уменьшает расход ресурса фидерных кабелей и снижает транспортные потери энергии в сети.

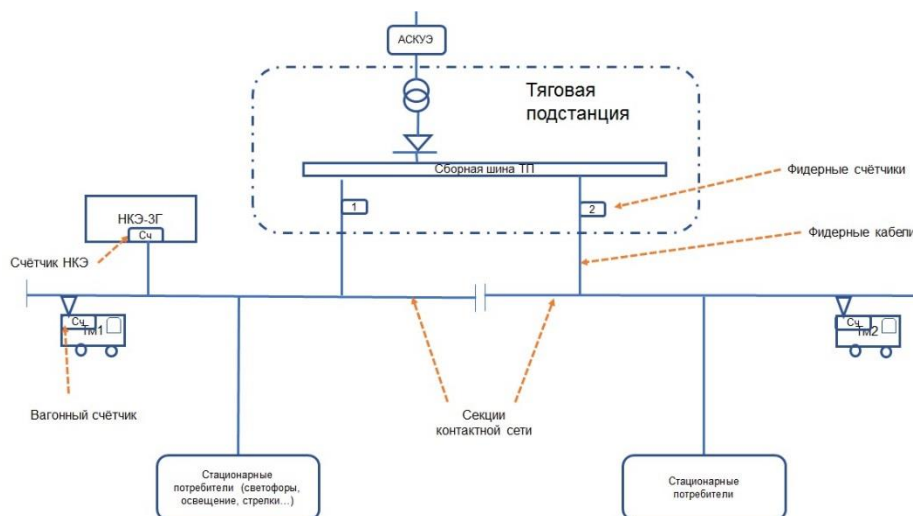


Рис. 1. Схематическое изображение схемы питания изолированных секций контактной сети

*Влияние накопителей рекуперативной энергии на снижение расходов на электроснабжение*

На сегодняшний день применение накопителей избыточной рекуперации в городском электро-транспорте рассматривается как одна из наиболее результативных возможностей по снижению затрат на энергию. Имеются только две схемы применения накопителей в СТЭ – установка их или на борту каждого вагона, или стационарно в контактной сети тяговых подстанций по одному накопителю на питаемую сеть. Как известно, количество работающих на линиях единиц подвижного состава превышает в предприятиях ГЭТ количество тяговых подстанций в 7–10 раз. При этом характеристики единичных накопителей для бортового и для стационарного применения, их комплектация и, соответственно, стоимость, практически не различаются. Это означает, что капитальные затраты при использовании бортовых накопителей, в сравнении со стационарными, практически на порядок выше. При этом и в первом случае, и во втором, общий объём энергии рекуперации задаётся только выполняемым подвижным составом объёмом транспортной работы, который остаётся неизменным и от наличия или отсутствия накопителей практически не зависит. Обои типами накопителей вся избыточная энергия рекуперации вовлекается в оборот, однако, с разными итогами этого вовлечения.

*Эффективность применения бортовых накопителей энергии*

Особенностью использования бортовых накопителей энергии (БНЭ) является изменение силовой электрической цепи вагона, при котором в накопитель направляется как избыточная рекуперация вагонов, так и потенциально полезные сетевые перетоки рекуперации. Вся энергия рекуперации тяговых приводов поступает на вход бортового накопителя. При этом практически все используемые накопители энергии (и бортовые, и стационарные, причём обоих применимых в ГЭТ по ресурсу циклирования технологических типов накопительных элементов – суперконденсаторных и маховичных) имеют одинаковый действительный КПД преобразований энергии – около 0,64 [7, 8]. Такая стадия (действительная) расчёта КПД принимает во внимание только потери энергии рекуперации при силовых преобразованиях на инверторных преобразователях и в накопительных элементах при её приёме и выдаче, а также утечки энергии при хранении. При поступлении на вход бортового накопителя в день, например, 200 кВт·ч энергии рекуперации обратно на клеммы тягового привода вернётся только 128 кВт·ч, остальное теряется при пяти этапах преобразований в ходе зарядки, хранения и выдачи энергии. Помимо потерь в силовом контуре бортовой накопитель дополнительно потребляет из сети энергию от оплачиваемого первичного энергоисточника – тяговых подстанций. Эта энергия расходуется на:

- собственные нужды системы управления и для кондиционирования накопительных элементов и системы управления,
- перевозку самого накопителя массой до 2 т (масса бортового накопителя формируется в зависимости от параметров самого вагона),
- компенсацию минимального уровня заряда суперконденсаторов на участках выбега после того, как рабочий объём запасённой ранее энергии рекуперации уже выдан на тяговый привод в ходе разгона вагона.

Показатель КПД накопителя энергии, в котором учитываются все перечисленные потери рекуперации и дополнительное потребление оплачиваемой энергии на обеспечение его работы, называется «фактическим КПД» и для бортового устройства имеет величину до 59,4 % [8]. Это означает, что работа бортового накопителя позволяет возвращать на полезную транспортную работу чуть более половины от энергии рекуперации вагона. При этом, как мы выше увидели, в системах ГЭТ без всяких накопителей (т.е. без капитальных затрат на их установку и эксплуатационных затрат на их обслуживание) по межпоездным перетокам полезной рекуперации через контактную сеть перенаправляется на сетевую нагрузку более 68 % от всей энергии рекуперации. И лишь менее трети приходится на избыточную рекуперацию, т.е. рассеивается теплом в атмосферу. Другими словами, применение бортовых накопителей энергии не улучшает энергоэффективность транспортной работы в сравнении с вариантом без применения накопителей, а ухудшает, и причиной тому служит неустраняемый недостаток его размещения – нахождение на борту транспортного средства, приводящее к перечисленным изменениям силовой цепи и появлению необходимости дополнительных затрат энергии на обеспечение их работы и перевозку.

Кроме того, бортовое размещение накопителей приводит, за счёт необходимости постоянной перевозки их, к дополнительному износу тягового привода, поскольку он вынужден перевозить дополнительную массу к таре вагона, т.е. прилагать увеличенные моменты при тяге. Помимо этого, интенсифицируется у трамваев с такими накопителями износ колёс и механически связанных с ними рельсовых путей, а у троллейбусов аналогично ускоряется износ шин и асфальтового покрытия дорог. То

есть увеличиваются амортизационные затраты транспортного предприятия пропорционально увеличению массы тары вагона.

#### *Эффективность применения стационарных накопителей энергии*

В отличие от бортовых стационарных накопителей энергии (СНЭ) никак не изменяют внутренние силовые цепи вагонов, а также не приводят к повышению их энергопотребления на тягу и нетяговые нужды. Также стационарный накопитель не изменяет объёмы перетоков полезной рекуперации по КС на наличную сетевую транспортную нагрузку достаточной мощности. Сетевые перетоки более эффективны, чем опосредствование перетоков рекуперации накопителем, – КПД передачи энергии по контактными проводам составляет 93 % [9], в силу чего при сетевых перетоках потери при равном объёме рекуперации в 5 раз ниже, чем при опосредствовании этого объёма накопителем, у которого действительный КПД не превышает 68,4 %. Таким образом, для предприятия электротранспорта наилучшим является такая стратегия задействования избыточной части энергии рекуперации на полезную работу, которая позволяет минимизировать опосредствование этой энергии накопителем. Единственным способом реализации этой стратегии является стационарное применение накопителей, поскольку при применении бортовых накопителей опосредствуется вся энергия рекуперации – и полезная, и избыточная её части, что соответствующим образом увеличивает объём потерь рекуперации. При использовании стационарного накопительного агрегата полезная часть рекуперации им не затрагивается, а избыточная часть опосредствуется накопителем лишь частично, поскольку другая часть избытка потребляется непосредственно сетевой нагрузкой в период зарядки накопителя, не поступая в него (эффект КБК) [6].

Суть этого эффекта состоит в том, что при отсутствии в КС достаточной по мощности полезной транспортной нагрузки стационарный накопитель включается на приём этой энергии, которая направляется от рекуперировавшего вагона по КС в сторону накопителя. В ходе зарядки накопителя этой перенаправленной избыточной энергией рекуперации также питается имеющаяся в сети малая по мощности нагрузка, главным образом – нетяговая бортовая и стационарная. Этот эффект питания сетевой нетяговой нагрузки в ходе зарядки стационарного накопителя получил название «эффект КБК».

Бортовой накопитель не может реализовать этот эффект в силу особенностей электрической силовой цепи такого типа применения. Вся энергия рекуперации в этом случае перетекает по кратчайшей цепи между тяговым приводом и бортовым накопителем и не имеет возможности питать ни чужую нагрузку в КС, ни нетяговую нагрузку своего вагона.

Соотношение долей перенаправленной избыточной рекуперации, которой питается нетяговая нагрузка при зарядке перенаправленной избыточной рекуперацией стационарного накопителя, и поступившей на вход стационарного накопителя, составляет по году примерно 1:1, хотя доли полезной и избыточной рекуперации сильно отличаются по сезонам [10]. Таким образом, потери по действительному КПД в стационарном накопителе распространяются только на ту часть энергии рекуперации, которая поступила на клеммы этого устройства ( $E_{заряд}^{СНЭ}$ ) и которая составляет лишь порядка 18 % от общего объёма энергии рекуперации вагона. То есть выдаваемая накопителем энергия избыточной рекуперации после всех затрат и потерь в накопителе ( $E_{выдачи}^{СНЭ}$ ) составляет ~ 10 % от общего объёма энергии рекуперации подвижного состава. С учётом того, что остальная часть энергии рекуперации поступает на повторное полезное использование как без участия накопителя (полезная рекуперация – 68 % от всей рекуперации), так и непосредственно в ходе зарядки накопителя (энергия, потреблённая сетевой нагрузкой при реализации эффекта КБК ( $E_{КБК}$ ) составляет порядка 18 % от общего объёма рекуперации), итоговый объём возвращаемой в КС на полезную транспортную работу при функционировании стационарного накопителя составляет от полного объёма энергии рекуперации ЭПС более 90 %:

$$E_{рек\_полезн} + E_{КБК} + E_{выдачи}^{СНЭ} \approx 0,911 * E_{рек} \quad (5).$$

Более высокий фактический КПД стационарного накопителя получается в силу того, что:

- ему не требуются затраты энергии на их каждодневную перевозку на борту транспортного средства,
- потребление оплачиваемой энергии от первичных энергоисточников (ТП) на собственные нужды (такие же, как и у бортовых накопителей – управление, кондиционирование и поддержка минимального рабочего уровня заряда) гораздо меньше в силу того, что большая часть энергии на эти нужды

поступает из бесплатного источника – от рекуперированных вагонов – в периоды зарядки накопителя и выдачи ранее запасённой рекуперированной энергии. А оплачиваемая энергия от ТП потребляется только в периоды выбега накопителя – то есть в периоды ожидания события зарядки или выдачи энергии. По году периоды выбега стационарного накопителя не превышают 23 % от времени работы его в сети, т.е. его коэффициент загрузки оборудования достигает 77 %. Для сравнения, число циклов работы бортового накопителя в сутки равно количеству торможений этого вагона и не превышает за 18 часов работы 400 раз – по количеству торможений своего подвижного состава. Между тем, число циклов заряда-разряда стационарных накопителей за рабочий день может достигать на средненагруженных ТП 4000 раз и более [10, 11], т.е. на порядок больше. Это сравнение показывает, что бортовой накопитель не только перевозится всё время работы вагона как дополнительный балластный груз, но и большую часть времени работы вагона сам не работает, т.е. имеет низкий коэффициент загрузки, не превышающий 10 %. В табл. 1 приведены показатели полезного использования энергии рекуперации в четырёх типах СТЭ: с вагонами РКСУ без полезной рекуперации, с системами ТрСУ с возможностью выдавать часть рекуперации в КС, с бортовыми накопителями, со стационарными накопителями.

Таблица 1

**Полезное использование энергии рекуперации с учётом избыточной части рекуперации, потерь и дополнительного потребления из КС, % от полной рекуперации  $E_{рек}$**

	Полезная рекуперация $E_{рек\_полез}$	Избыточная рекуперация $E_{рек\_избыт}$	Выдача ЭЭ накопителем на нагрузку $E_{НЭ\_выдачи}$	Эффект КБК $E_{КБК}$	Энергозатраты на перевозку НЭ	Энергозатраты собственных нужд НЭ	Компенсация поддержки минимального заряда	Итого, возврат энергии, % от $E_{рек}$
РКСУ	0	100	0	0	0	0	0	0
ТрСУ	64	36	0	0	0	0	0	64
Бортовые, БНЭ	0	0	68,4	0	2,7	5,4	8,1	52,2
Стационарные, СНЭ	64	0	10	18	0	4,6	4,3	91,1

*Влияние накопителей энергии на потребление оплачиваемой электроэнергии от ТП*

Установка накопителей энергии на борту подвижного состава вызывает следующие изменения в потреблении энергии от оплачиваемых первичных источников – тяговых подстанций:

– увеличение потребления энергии на тягу ПС из-за увеличения массы тары вагонов, т.к. БНЭ подходящей мощности и энергоёмкости для троллейбусов и трамваев имеет полную массу, включая накопительные элементы, силовой преобразователь, блок управления, систему охлаждения, оснастку, крепёж, дополнительную электропроводку, – порядка 1,5–2 т (в зависимости от массы вагона). Увеличение – это может достигать 7 % от тягового энергопотребления аналогичного вагона без БНЭ;

– снижение энергопотребления на тягу благодаря перенаправлению полезной и избыточной энергии рекуперации на тягу своего привода;

– увеличение тягового энергопотребления из-за низкого действительного КПД БНЭ (68,4 %) в сравнении с фактическим КПД передачи энергии рекуперации по КС (93 %);

– запрет межпоездных перетоков полезной рекуперации бортовыми накопителями лишает другие вагоны получения энергии рекуперации от тормозящих единиц ПС;

– увеличение нетягового энергопотребления самого рекуперированного вагона в силу того, что энергия рекуперации не выходит за контур цепи «тяговый привод – бортовой накопитель», т.е. не питает бесплатной энергией нетяговую нагрузку своего вагона;

– увеличение нетягового энергопотребления самого рекуперированного вагона в силу того, что энергия для обеспечения собственных нужд БНЭ (системы управления и охлаждения, компенсация разряда суперконденсаторов) необходимо потребление энергии, а она доступна только из КС от первичного оплачиваемого энергоисточника;

– увеличение нетягового энергопотребления других вагонов в КС в силу того, что энергия рекуперации тормозящего вагона не выходит в КС по межпоездным перетокам рекуперации за контур его участка цепи «тяговый привод – бортовой накопитель»;



– увеличение нетягового энергопотребления стационарной нагрузки в КС в силу того, что энергия рекуперации тормозящего вагона не выходит в КС по межпоездным перетокам рекуперации за контур его участка цепи «тяговый привод – бортовой накопитель».

Сведение полного баланса энергии источников и нагрузки в СТЭ ГЭТ с бортовыми накопителями показывает, что применение БНЭ, в сравнении с системами без накопителей энергии, приводит к увеличению потребления энергии от оплачиваемых первичных энергоисточников на 4,5 % [12]. Т.е. при таком способе вовлечения в оборот всей энергии рекуперации увеличивается статья расходов предприятия на потребление электроэнергии.

Установка *стационарных* накопителей энергии в КС тяговых подстанций вызывает следующие изменения в потреблении энергии от оплачиваемых первичных источников – тяговых подстанций:

– снижение потребления оплачиваемой энергии от ТП на тягу ПС в силу сохранения межпоездных перетоков рекуперативной энергии по КС и вовлечения в полезный оборот избыточной рекуперации. Перенаправленная при функционировании стационарного НЭ на полезную работу избыточная рекуперация потребляется по двум каналам: при зарядке в силу действия «эффекта КБК» и при выдаче в сеть ранее запасённой им части энергии избыточной рекуперации вагонов. Суммарно использование рекуперативной энергии при применении СНЭ увеличивается до 91,1 %. При этом, поскольку установка стационарных накопителей не изменяет массы тары вагонов, общий объём перевозочной работы подвижного состава не изменяется;

– увеличение нетягового энергопотребления СТЭ за счёт потребления на собственные нужды самого СНЭ (система управления и вентиляции, поддержка минимального рабочего уровня зарядки накопительного элемента). При этом оплачиваемое энергопотребление на собственные нужды СНЭ существенно ниже, чем у БНЭ, поскольку значительная часть этого потребления осуществляется от потоков перенаправленной энергии избыточной рекуперации тормозящих вагонов как в ходе зарядки, так и разрядки стационарных накопителей. Время циркулирования рекуперации через СНЭ, которой также питается и нагрузка собственных нужд его, достигает 77 % от времени его работы, а у БНЭ нагрузка собственных нужд питается только оплачиваемой энергией от ТП;

– объём выполняемой работы нетягового оборудования всех вагонов в КС, а также стационарных сетевых устройств не изменяется. Но на эту работу потребляется меньший объём оплачиваемой энергии от тяговых подстанций, поскольку она частично замещается вовлечённой в оборот благодаря СНЭ избыточной части энергии рекуперации вагонов.

Сведение полного баланса энергии источников и нагрузки в системах ГЭТ со стационарными накопителями показывает, что применение СНЭ приводит к снижению потребления энергии от оплачиваемых первичных энергоисточников на 20 % [12]. То есть при таком способе вовлечения в оборот всей энергии рекуперации значение статьи расходов предприятия на потребление электроэнергии значительно уменьшается. Кроме того, СНЭ не приводят к дополнительному износу ни тягового оборудования ПС, ни нетягового бортового и стационарного транспортного оборудования.

#### *Дополнительные эффекты при использовании накопителей энергии*

Для получения на клеммах сетевой полезной нагрузки 1 кВт·ч энергии ( $E_{нагр}$ ) по КС от тяговой подстанции требуется учесть потери энергии, получаемые при транспортировке её по КС и фидерным кабелям, а также при преобразовании трёхфазной высоковольтной энергии напряжением 10 кВ на ТП в энергию постоянного тока номинальным напряжением 600 В. Потери энергии в КС составляют ~7 % от объёма передаваемой энергии [9]. Потери при преобразованиях на ТП составляют до 10 % от выдаваемой в КС выпрямленной энергии. Таким образом, если на клеммы сетевой нагрузки поступает 1 кВтч в виде постоянного тока, то на вход тяговой подстанции должно поступить из трёхфазной сети высокого напряжения, учтённой счётчиком АСКУЭ энергопоставщика ( $E_{АСКУЭ}$ ):

$$E_{АСКУЭ} = \frac{E_{нагр}}{\eta_{КС} * \eta_{ТП}} = \frac{E_{нагр}}{0,93 * 0,9} = 1,195 * E_{нагр}, \quad (6)$$

где  $\eta_{КС}$  и  $\eta_{ТП}$  – КПД, соответственно, передачи энергии по контактной сети и преобразования энергии на тяговой подстанции, а  $E_{нагр}$  – поступившая на клеммы полезной сетевой нагрузки электроэнергия.

Использование бесплатной энергии рекуперации на повторное выполнение транспортной работы замещает оплачиваемое потребление энергии от первичного энергоисточника. Транспортные системы, в которых подвижной состав оснащён системами ТрСУ и *отсутствуют накопители* обоих типов, имеют экономию оплачиваемой энергии от первичного источника только от полезных перетоков

энергии рекуперации по КС на синхронную достаточную нагрузку. Поскольку при этом потери энергии на передачу её по КС заложены в данные отпусчного счётчика постоянного тока, размещённого на клеммах тягового привода, то, исходя из данных в табл. 1, формула (6) для случая отсутствия накопителей любого типа принимает вид

$$E_{АСКУЭ\_экон}^{ТрСУ} = \frac{E_{рек\_ползн}}{\eta_{ТП}} = \frac{E_{рек\_ползн}}{0,9} = 1,111 * E_{рек\_ползн} = 1,111 * (0,64 * E_{рек}) = 0,711 * E_{рек}. \quad (7 а)$$

Для расчёта объёмов экономии оплачиваемой энергии первичного энергоисточника при работе *бортового накопителя* следует учитывать, что выдаваемая БНЭ энергия на тяговый привод своего вагона в КС не выходит, то есть эти потери здесь отсутствуют. Для учёта скомпенсированных БНЭ сетевых и подстанционных потерь необходимо привести значение получаемой на клеммы своего тягового привода энергии выдаваемой накопителем ранее запасённой рекуперации к значению подаваемой в КС на эти цели от трёхфазной высоковольтной сети энергии (к точке учёта АСКУЭ). То есть для определения полного значения замещённой бортовым накопителем оплачиваемой энергии от энергопоставщика ( $E_{АСКУЭ\_экон}^{БНЭ}$ ) следует умножить полученное потребителем значение выдаваемой рекуперированной энергии по постоянному току в точке приёма энергии тяговым приводом вагона на полученный в (6) коэффициент потерь, равный 1,195, поскольку при работе БНЭ энергия рекуперации в КС не выходит, а с учётом данных из табл. 1:

$$E_{АСКУЭ\_экон}^{БНЭ} = \frac{E_{рек\_нагр}^{БНЭ}}{\eta_{КС} * \eta_{ТП}} = 1,195 * E_{рек\_нагр}^{БНЭ} = 1,195 * E_{выдачи}^{БНЭ} = 1,195 * (0,522 * E_{рек}) = 0,624 * E_{рек}. \quad (7 б)$$

Из (7 б) видно, что для бортового накопителя отсутствуют как полезные перетоки энергии рекуперации по КС, так и перетоки от «эффекта КБК», а вся рекуперация с тягового привода опосредствуется бортовым накопителем и выдаётся (с учётом всех потерь и дополнительного оплачиваемого потребления) обратно на этот же привод, но работающий уже в режиме тяги.

Потоки полезной рекуперации и перенаправленная *стационарным накопителем* избыточная рекуперация передаются на нагрузку по КС, т.е. потери в КС в неё уже заложены. В силу этого для приведения энергии рекуперации к высоковольтной трёхфазной сети (точке учёта АСКУЭ) в таких конфигурациях СТЭ с СНЭ необходимо учесть только потери при преобразованиях на тяговой подстанции и формула (6) принимает вид, с учётом данных по СНЭ из табл. 1:

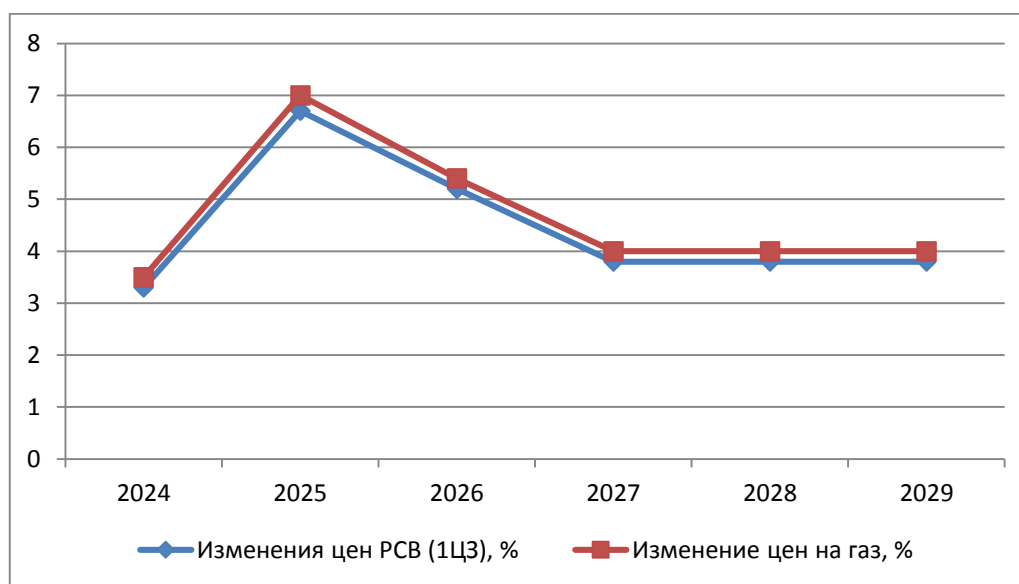
$$E_{АСКУЭ\_экон}^{СНЭ} = \frac{E_{рек\_нагр}^{СНЭ}}{\eta_{ТП}} = \frac{E_{рек\_ползн} + E_{КБК} + E_{выдачи}^{СНЭ}}{\eta_{ТП}} = 1,111 * (0,911 * E_{рек}) = 1,011 * E_{рек}. \quad (8)$$

Увеличение применения бесплатной рекуперативной энергии за счёт перенаправления в КС стационарным накопителем избытка на выполнение полезной транспортной работы приводит к снижению потребления оплачиваемой энергии от первичных оплачиваемых энергоисточников на величину перенаправленного избытка при зарядке и выдаче энергии накопителя с учётом КПД ТП.

Таким образом, работа бортовых накопителей энергии экономит оплачиваемую энергию от ТП меньше, чем система энергоснабжения транспортной работы на предприятиях ГЭТ без накопителей энергии в силу существенно больших потерь при преобразованиях, перевозке и увеличения потребления оплачиваемой энергии на собственные нужды и компенсацию утечек в таком накопителе. Применение стационарных накопителей энергии обеспечивает увеличение использования энергии рекуперации в сравнении с бортовыми накопителями более чем в полтора раза и превышает использование рекуперации в системах без накопителей на 42 %.

*Стоимость задействования энергии рекуперации на период до 2029 г.*

На среднесрочную перспективу уровень тарифов на электроэнергию будет стабильно расти, причём достаточно высокими темпами. Так, в компании «Лукойл» составили долгосрочный прогноз тарифов на электроэнергию на период с 2024 по 2029 гг., который опирается на прогнозы цен на газ и уголь, планы ввода в эксплуатацию новых энергогенерирующих мощностей и на прогнозы социально-экономического развития Российской Федерации и сценарные условия функционирования экономики [13]. Графики на рис. 2 показывают практически однозначную корреляцию динамики цен на газ и на электроэнергию на рынке электроэнергии на сутки вперёд (РСВ) в первой ценовой зоне (европейская часть страны). Такая же высокая корреляция имеется в тарифах на электроэнергию на РСВ с ценами на уголь в объединённой энергосистеме Сибири.



**Рис. 2. Динамика изменения цен РСВ и цен на топливо в 2024–2029 гг. (первая ценовая зона)**

Рассмотрим, как будут изменяться в этот период затраты предприятия электротранспорта в Северо-Западном федеральном округе, которое упоминалось выше (4 маршрута, 5 тяговых подстанций, 20 единиц ЭПС на линии). Транспортная работа предприятия является устойчивой, как и пассажиропоток, и изменений пробега вагонов не ожидается. Соответственно, устойчивым (в пределах годовых колебаний погодных условий) будет энергопотребление на тягу и нетяговые нужды подвижного состава и стационарной инфраструктуры, в том числе от первичного оплачиваемого энергоисточника (тяговой подстанции) и от полезных перетоков бесплатной энергии рекуперации от вторичных энергоисточников (рекуперирующих вагонов). На 2022 г. полное годовое потребление системы, приведённое к точке учёта электроэнергии по высоковольтной трёхфазной стороне ( $E_{ACKVЭ}$ ) составляет 12,32 млн кВт·ч, из которых на оплачиваемую энергию от энергопоставщика приходится 10,74 млн кВт·ч, а на полезные перетоки рекуперативной энергии приходится 1,58 млн кВт·ч. При этом приведённый полный потенциал экономии энергии за счёт оставшейся повторно неиспользованной избыточной энергии рекуперации составляет порядка 1,59 млн кВт·ч.

Как видно из предыдущего изложения, максимально снизить оплачиваемое потребление из сети можно только путём вовлечения на повторную работу этой избыточной части энергии рекуперации, что возможно только за счёт применения буферных накопителей энергии – стационарных или бортовых. При этом использование бортовых накопителей снизит до нуля полезные перетоки рекуперации по контактной сети, а весь суммарный объём рекуперации будет опосредствован работой этих устройств. В этой работе будет потеряно 36 % всей рекуперированной вагоном энергии и, кроме того, будет дополнительно потреблено от оплачиваемого первичного энергоисточника порядка 0,3329 от потреблённой на тягу составов с бортовыми накопителями электроэнергии. Суммарно годовой объём оплачиваемой энергии в этом случае в сравнении с имеющимся базовым вариантом увеличится на 2,51 млн кВт·ч.

Применение стационарных накопителей сохраняет все полезные перетоки рекуперации, незначительно увеличит потребление энергии сети на свои нетяговые нужды (на 0,006 от потреблённой электроэнергии на тягу составов без накопителей) и позволяет перенаправить на повторное использование (с учётом КПД стационарного накопителя) 1,35 млн кВт·ч избыточной рекуперации (за счёт эффекта КБК и выдачи в КС части накопленной в агрегат избыточной рекуперации), которая заместит аналогичный объём оплачиваемой энергии от тяговой подстанции.

На 2022–2023 гг. среднегодовой котловой тариф на электроэнергию, закупаемой рассматриваемой организацией ГЭТ, составлял порядка 8 руб. за 1 кВт·ч. Его изменение на период 2024–2029 гг. примем на основе прогноза компании «Лукойл» (рис. 2), в котором указаны проценты изменения тарифов год к году. В итоге в системе без любых накопителей энергии за 6 лет суммарный объём затрат на закупку оплачиваемой электроэнергии составит 605,37 млн рублей.

При установке бортовых накопителей энергии, как было указано, ежегодное потребление оплачиваемой электроэнергии вырастет в сравнении с базовым текущим вариантом перетоков только полезной части рекуперации по КС на 2,51 млн кВт·ч, а суммарные затраты на закупку электроэнергии за период с 2024 по 2029 г. составят 746,83 млн рублей.

При работе стационарных накопителей на участках питания тяговых подстанций потребление оплачиваемой электроэнергии снизится, в сравнении с базовым текущим вариантом перетоков только полезной части рекуперации по КС, на 1,35 млн кВт·ч в год, а суммарные затраты на закупку электроэнергии за период с 2024 по 2029 г. составят 529,26 млн рублей. Изменения ежегодной оплаты за электроэнергию от первичных энергоисточников при одинаковой работе по пассажироперевозкам рассматриваемого предприятия ГЭТ при реализации трёх вариантов обращения с рекуперированной энергией представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Прогноз затрат на оплачиваемую часть энергии в СТЭ ГЭТ при разных вариантах обращения с рекуперацией на период 2024–2029 гг., млн рублей**

	2024 г.	2025 г.	2026 г.	2027 г.	2028 г.	2029 г.
Оплата за энергию в СТЭ без накопителей	88,77	94,72	99,65	103,43	107,36	111,44
Оплата за энергию в СТЭ с БНЭ	109,52	116,85	122,93	127,6	132,45	137,48
Оплата за энергию в СТЭ с СНЭ	77,61	82,81	87,12	90,43	93,86	97,43

Приведённые расчёты показывают, что при полной оснащённости электроподвижного состава рассматриваемой трамвайной системы тяговыми приводами доля приведённой полезно использованной рекуперации (межпоездной обмен полезной части рекуперированной энергии) составляет порядка 12,83 % от суммарного приведённого энергопотребления системы. Затраты на закупку оплачиваемой части потребляемой энергии за 6 лет для такой системы, исходя из прогнозных объёмов потребления и котловых тарифов, будут на 145 млн рублей меньше, чем при использовании бортовых накопителей энергии. Использование стационарных накопителей энергии позволит сэкономить в сравнении с вариантом без накопителей – 76,12 млн рублей. В сравнении с вариантом использования бортовых накопителей экономия, приносимая стационарными накопителями, составит 217,57 млн рублей.

Приведённые прогнозы показывают, что единственным способом снижения затрат на энергию в такой системе будет установка стационарных накопителей энергии на участки питания тяговых подстанций. Аналогичный вывод был сделан отечественными исследователями о неприменимости бортовых накопителей на грузовых локомотивах в железнодорожной системе [16].

*Перспективы обращения сертификатов на возобновляемую электроэнергию электротранспорта*

Возможность использования для осуществления транспортной работы до 25 % энергии из возобновляемых источников позволяет рассматривать как реальную возможность получения городским электротранспортом на этот объём энергии рекуперации сертификатов «зелёной энергии» I-REC (международных сертификатов на возобновляемую энергию International Renewable Energy Certificate). Реализация данных зелёных сертификатов возможна, например, на Европейской энергетической бирже (EEX), бирже Nord Pool и американской PJM Interconnection и позволит покупателям сертификатов возобновляемой в электротранспорте энергии компенсировать воздействие собственного бизнеса на окружающую среду. В России уже положено начало обороту зелёных сертификатов происхождения энергии [14]. Для самого предприятия ГЭТ этот финансовый инструмент позволит привлечь дополнительные средства в развитие эффективности полезного освоения рекуперации, в том числе в модернизацию подвижного состава с целью замены вагонов с РКСУ на аналогичные с ТрСУ, позволяющие выдавать рекуперированную энергию на потребление другой нагрузкой в контактной сети, и в применение передовых технологий накопителей энергии, которые позволяют переводить в полезную рекуперацию и ту часть, которая называется избыточной, т.е. полностью использовать рекуперацию на повторное применение для выполнения транспортной работы.

Одним из препятствий в нынешнем законодательном поле для реализации электротранспортными предприятиями сертификатов «зелёной» электроэнергии I-REC служит барьер необходимости

квалификации генерирующего оборудования предприятия ГЭТ согласно Постановлению Правительства РФ от 3 июня 2008 года, N 426 [15]. Однако имеются варианты выхода из этого положения. Например, генерирующие компании, которые уже имеют квалификацию части своего оборудования как отвечающего этому требованию, могут за известную плату с дисконтом приобретать право замещения аналогичной доли своей энергией, не подпадающей под квалификацию «зелёной», на эту возобновляемую энергию полезной рекуперации предприятия горэлектротранспорта. На этот объём энергии генерирующая компания сможет получить сертификат I-REC и реализовать его заинтересованному покупателю. Учёт возобновляемой электроэнергии рекуперации будет производиться сертифицированными счётчиками, регистрирующими выдачу тяговыми приводами энергии в контактную сеть. Такими счётчиками оборудован весь подвижной состав, а также фидерные кабели на сборной шине тяговых подстанций. Таким образом, могут быть удовлетворены требования указанного постановления. При этом генерирующие объекты в ГЭТ, – тяговые приводы в импульсном режиме генерации, аналогичны, например, генераторам ветряных электростанций по своему импульсному режиму и типу первичного источника энергии – механической, а также генерирующим объектам на основе переработки отходов производства – по происхождению первичного источника энергии не из природной среды, а из техносферы. Данная возможность требует проработки заинтересованных сторон, которыми являются генерирующие организации на основе ВИЭ, предприятия ГЭТ, управляющие организации российского рынка электроэнергии, государственные органы, регулирующие этот рынок, потребители зелёных сертификатов происхождения энергии. Очевидно, что описанная возможность имеет потенциал принесения экономической пользы как предприятиям горэлектротранспорта, так и генерирующим компаниям с квалифицированными «зелёными» энергоисточниками, а также другим субъектам рынка сертификатов. Кроме того, эта экономическая ниша будет реально способствовать снижению давления на рост тарифов на электроэнергию.

### **Выводы**

Перенаправление энергии рекуперации имеет нулевую себестоимость в силу отсутствия закупки этого энергоресурса у сторонних организаций, а также в силу отсутствия дополнительного износа собственного энергооборудования (тяговых приводов) подвижного состава.

Применение рекуперативной энергии торможения подвижного состава на повторное выполнение полезной транспортной работы в городском электротранспорте снижает потребление оплачиваемой энергии первичных энергоисточников, т.е. снижает затраты предприятия на закупку энергоресурсов.

Для полного перенаправления избыточной рекуперативной энергии на выполнение полезной работы по пассажироперевозкам одним из действенных способов является применение накопителей энергии. При этом применение бортовых накопителей в ГЭТ несёт большие потери рекуперации и, одновременно, значительно увеличивает потребление оплачиваемой энергии от ТП и, тем самым, повышает затраты предприятия на энергоресурсы. Кроме того, бортовые накопители приводят к ускорению износа систем тяги, у трамваев – колёс и рельсовых путей, у троллейбусов – шин и асфальтового покрытия дорог. То есть внедрение бортовых накопителей любого типа на нынешнем уровне накопительной техники экономически убыточно для транспортного предприятия и городского дорожного хозяйства.

Использование стационарных накопителей энергии снижает оплачиваемое энергопотребление и экономически выгодно для предприятия ГЭТ.

Для транспортного предприятия с целью полного перенаправления энергии рекуперации на повторную полезную работу требуется бортовых накопителей в количестве, равном числу единиц подвижного состава, а стационарных накопителей – в 6–10 раз меньше – по количеству тяговых подстанций. При этом стоимости стационарных и бортовых накопителей равны. Высокие капитальные затраты на применение бортовых накопителей, являются вторым экономическим аргументом против их применения на городском электротранспорте.

Для получения объёма замещения оплачиваемой энергии ТП на бесплатную энергию рекуперации требуется, с использованием коэффициентов КПД в КС и на ТП, привести значение измеренных на стороне постоянного тока объёмов последней к значению потребления на высоковольтной стороне ТП в точке присоединения АСКУЭ.

Энергия рекуперации в ГЭТ является возобновляемой, а непосредственным источником её является механическая энергия линейного движения подвижного состава. Увеличению экономического эффекта от повторного использования рекуперации на выполнение транспортной работы может способствовать организация оборота сертификатов «зелёной энергии» I-REC на этот тип возобновляемой энергии.

## Список литературы

- 1 **Зубакин, В. А.** Анализ рисков дисбаланса структуры генерации и потребления электроэнергии при развитии Единой энергосистемы России / В. А. Зубакин // Российские естественные монополии : системные проблемы и решения: сборник статей. – Вып.1. – Москва : ИПЕМ, 2006. – 120 с.
- 2 **Сулим, А. А.** Расчет электроэнергии рекуперации электрифицированного городского транспорта при установке накопителя на тяговой подстанции / А. А. Сулим // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика. – 2014. – Вып. 4. – Ч. 4. – С. 30–41. – ISSN 1029-7448.
- 3 **Bartłomiejczyk, M.** Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery / M. Bartłomiejczyk, M. Połom // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 127. – P. 35–42. – DOI 10.1016/j.enconman.2016.08.089.
- 4 Energy recovery effectiveness in trolleybus transport / S. Hamacek, M. Bartłomiejczyk, R. Hrbáč [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2014. – 112. – P. 1–11. – ISSN 0378-7796.
- 5 «Зеленые» технологии : в Россию возвращается рекуперация энергии. – URL: <https://zaorotec.ru/content/zelenye-tekhnologii-v-rossiyu-vozvrashchaetsya-rekuperatsiya-energii/> (дата обращения: 29.09.2023).
- 6 **Кацай, А. В.** Утилизация избыточной рекуперации в контактной сети электротранспорта при зарядке стационарного накопителя / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Электрические системы и комплексы. – 2023. – № 1 (58). – С. 10–20. – ISSN 2311-8318.
- 7 **Чернигов, В. М.** Электрооборудование трамвайного вагона с емкостным накопителем / В. М. Чернигов // Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-izbytochnoy-rekuperatsii-v-kontaktnoy-seti-elektrotransporta-pri-zaryadke-statsionarnogo-nakopitelya/viewer> (дата обращения: 22.07.2022).
- 8 **Кацай, А. В.** Коэффициенты полезного действия накопителя энергии в контактной сети горэлектротранспорта / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия : Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 4 (76). – С. 127–141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9.
- 9 Методические рекомендации по расчету экономически обоснованной стоимости перевозки пассажиров и багажа в городском и пригородном сообщении автомобильным и городским наземным электрическим транспортом общего

## References

- 1 **Zubakin, V. A.** Risk analysis of the imbalance of the structure of generation and consumption of electricity in the development of the Unified energy system of Russia / V. A. Zubakin // Russian natural monopolies : systemic problems and solutions: Collection of articles. – Issue. 1. – Moscow : IPPEM, 2006. – 120 p.
- 2 **Sulim, A. A.** Calculation of electric power recovery of electrified urban transport when installing a storage device at a traction substation / A. A. Sulim // Izvestiya of higher educational institutions and energy associations of the CIS. Energy. – 2014. – Issue 4. – Part 4. – P. 30–41. – ISSN 1029-7448.
- 3 **Bartłomiejczyk, M.** Multiaspect measurement analysis of breaking energy recovery / M. Bartłomiejczyk, M. Połom // Energy Conversion and Management. – 2016. – Vol. 127. – P. 35–42. – DOI 10.1016/j.enconman.2016.08.089.
- 4 Energy recovery effectiveness in trolleybus transport / S. Hamacek, M. Bartłomiejczyk, R. Hrbáč [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2014. – 112. – P. 1–11. – ISSN 0378-7796.
- 5 "Green" technologies : energy recovery is returning to Russia. – URL: <https://zaorotec.ru/content/zelenye-tekhnologii-v-rossiyu-vozvrashchaetsya-rekuperatsiya-energii/> (date of accessed: 09/29/2023).
- 6 **Katsay, A. V.** Utilization of excess recovery in the contact network of electric transport when charging a stationary storage device / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // Electrical systems and complexes. – 2023. – No. 1 (58). – P. 10–20. – ISSN 2311-8318.
- 7 **Chernigov, V. M.** Electrical equipment of a tram car with a capacitive storage device / V. M. Chernigov // Cyberleninka.ru. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/utilizatsiya-izbytochnoy-rekuperatsii-v-kontaktnoy-seti-elektrotransporta-pri-zaryadke-statsionarnogo-nakopitelya/viewer> (date of accessed: 07/22/2022).
- 8 **Katsay, A. V.** Efficiency coefficients of an energy storage device in the contact network of the city electric transport / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // Bulletin of Samara State Technical University. Series : Technical Sciences. – 2022. – Vol. 30, No. 4 (76). – P. 127–141. – DOI 10.14498/tech.2022.4.9.
- 9 Methodological recommendations for calculating the economically justified cost of transporting passengers and luggage in urban and suburban transport by road and urban ground electric public transport (as amended by the Order of the Ministry

пользования (в ред. распоряжения Минтранса России от 25.12.2013 г. № НА-143-р).

10 **Ярославцев, М. В.** Сезонные колебания потребления электрической энергии троллейбусом / М. В. Ярославцев, Н. И. Щуров // Наука. Технологии. Инновации : материалы всерос. науч. конф. молод. ученых ; Новосибирск, 21–24 ноября 2013 г. – Новосибирск : Издательство Новосиб. гос. техн. ун-та, 2013. – Ч. 6. – С. 187–191. – ISBN 978-5-7782-2344-8.

11 Показатели работы стационарного накопителя энергии на тяговых подстанциях московского метрополитена / Л. А. Баранов, В. А. Гречишников, А. В. Ершов [и др.] // Электротехника. – 2014. – № 8. – С. 18–21. – ISSN 0013-5860.

12 **Кацай, А. В.** Преобразование энергии рекуперации в городском электротранспорте / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 43. – С. 5–28. – DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01.

13 Сценарные условия функционирования экономики Российской Федерации и основные параметры прогноза социально-экономического развития Российской Федерации на 2024 год и на плановый период 2025 и 2026 годов // Министерство экономического развития Российской Федерации : сайт. – URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/scenarnye\\_usloviya\\_funkcionirovaniya\\_ekonomiki\\_rossiyskoy\\_federacii\\_i\\_osnovnye\\_parametry\\_prognoza\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_2024\\_god\\_i\\_na\\_planovyy\\_period\\_2025\\_i\\_2026\\_godov.html?ysclid=lnrlz1a968767325](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/scenarnye_usloviya_funkcionirovaniya_ekonomiki_rossiyskoy_federacii_i_osnovnye_parametry_prognoza_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_2024_god_i_na_planovyy_period_2025_i_2026_godov.html?ysclid=lnrlz1a968767325) (дата обращения: 15.10.2023).

14 **Столбунов, В.** На российском рынке зеленых сертификатов при участии холдинга Эн+ заключена крупнейшая сделка по стандарту Carbon Zero / В. Столбунов // Независимая газета. – URL: [https://www.ng.ru/economics/2023-04-18/100\\_2304181340.html](https://www.ng.ru/economics/2023-04-18/100_2304181340.html) (дата обращения: 29.09.2023).

15 О квалификации генерирующего объекта, функционирующего на основе использования возобновляемых источников энергии (с изменениями и дополнениями). Постановление Правительства РФ от 3 июня 2008 г. N 426.

16 **Незевак, В. Л.** Сравнение вариантов применения накопителей электроэнергии в системе тягового электроснабжения и на электроподвижном составе / В. Л. Незевак // Транспорт :

of Transport of the Russian Federation dated 12/25/2013 No. NA-143-r).

10 **Yaroslavtsev, M. V.** Seasonal fluctuations in electric energy consumption by trolleybus / M. V. Yaroslavtsev, N. I Shchurov // Nauka. Technologies. Innovations : materials of the All-Russian scientific conference. young. Scientists ; Novosibirsk, November 21–24, 2013. – Novosibirsk : Publishing House of Novosibirsk State Technical University, 2013. – Part 6. – P. 187–191. – ISBN 978-5-7782-2344-8.

11 Performance indicators of stationary energy storage at traction substations of the Moscow metro / L. A. Baranov, V. A. Grechishnikov, A. V. Ershov [et al.] // Electrical Engineering. – 2014. – No. 8. – P. 18–21. – ISSN 0013-5860.

12 **Katsay, A. V.** Transformation of energy recovery in urban electric transport / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems. – 2022. – No. 43. – P. 5–28. – DOI 10.15593/2224-9397/2022.3.01.

13 Scenario conditions of the functioning of the economy of the Russian Federation and the main parameters of the forecast of socio-economic development of the Russian Federation for 2024 and for the planning period of 2025 and 2026 // Ministry of Economic Development of the Russian Federation: website. – URL: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya/scenarnye\\_usloviya\\_funkcionirovaniya\\_ekonomiki\\_rossiyskoy\\_federacii\\_i\\_osnovnye\\_parametry\\_prognoza\\_socialno\\_ekonomicheskogo\\_razvitiya\\_rossiyskoy\\_federacii\\_na\\_2024\\_god\\_i\\_na\\_planovyy\\_period\\_2025\\_i\\_2026\\_godov.html?ysclid=lnrlz1a968767325](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/scenarnye_usloviya_funkcionirovaniya_ekonomiki_rossiyskoy_federacii_i_osnovnye_parametry_prognoza_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rossiyskoy_federacii_na_2024_god_i_na_planovyy_period_2025_i_2026_godov.html?ysclid=lnrlz1a968767325) (date of accessed: 10/15/2023).

14 **Stolbunov, V.** In the Russian market of green certificates, with the participation of En+ holding, the largest transaction under the Carbon Zero standard was concluded / V. Stolbunov // Nezavisimaya Gazeta. – URL: [https://www.ng.ru/economics/2023-04-18/100\\_2304181340.html](https://www.ng.ru/economics/2023-04-18/100_2304181340.html) (date of accessed: 09/29/2023).

15 On the qualification of a generating facility operating on the basis of the use of renewable energy sources (with amendments and additions). Resolution of the Government of the Russian Federation of June 3, 2008 No. 426.

16 **Nezevak, V. L.** Comparison of options for the use of electric power storage devices in a traction power supply system and on an electric rolling

наука, техника, управление. Научный информационный сборник. – 2020. – № 9. – С. 17–23. – DOI 10.36535/023619142020094.

17 **Кацай, А. В.** Экспериментальное определение объемов оплачиваемых потерь электроэнергии в контактной сети городского электро-транспорта с рекуперацией / А. В. Кацай, М. В. Шевлюгин // Известия Транссиба. – 2024. – № 1 (57). – С. 116–130. – ISSN 2220-4245.

stock / V. L. Nezevak // Transport : science, technology, management. Scientific Information Collection. – 2020. – No. 9. – P. 17–23. – DOI 10.36535/023619142020094.

17 **Katsay, A.V.** Experimental determination of the volume of paid electricity losses in the contact network of urban electric transport with recovery / A. V. Katsay, M. V. Shevlyugin // News of the Transsib. – 2024. – No. 1 (57). – P. 116–130. – ISSN 2220-4245.

*A. V. Katsay, V. A. Zubakin*

## COST ANALYSIS OF REGENERATIVE ENERGY OF URBAN ELECTRIC TRANSPORT

**Abstract.** The study examines the cost aspects of the processes of energy recovery in electric transport and its reuse for useful transportation work. The purchase cost of recovered energy is zero. Regenerative braking does not cause additional wear on the elements of the car traction systems. Due to this, recuperative energy directed for useful reuse has zero cost. With the use of on-board or stationary storage devices, the excess part of the recovery energy can be redirected to repeated useful work. Since the efficiency of any storage devices does not exceed 64–68 %, the losses from the total energy of recovery in on-board storage devices exceed a third of its volume. In addition, energy is additionally consumed from the network for its own needs and transportation of on-board storage devices. Stationary storage devices are not transported, completely preserve the useful network flows of recuperation, ensure direct consumption of it by the network load during charging and release the stored part of it to the network after storage. Compared to the absence of storage devices of any type, on-board devices lead to an increase in the billable energy consumption of the GET, while stationary devices significantly reduce it.

**Keywords:** energy sources, contact network, useful and excess energy of regenerative braking, stationary and on-board storage, redirection of excess recovery, cost form, costs, paid energy, tariffs.

**For citation:** Katsai, A. V. Cost analysis of regenerative energy of urban electric transport / A. V. Katsay, V. A. Zubakin // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putey Soobshcheniya. – 2024. – No. 2. – P. 57–72. – DOI 10.46973/0201-727X\_2024\_2\_57.

### Сведения об авторах

**Кацай Александр Владимирович**

ООО «Кинемак»,  
генеральный директор,  
кандидат философских наук,  
e-mail: proton764@@mail.ru

**Зубакин Василий Александрович**

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина,  
кафедра (базовая) возобновляемых источников  
энергии (на базе  
ООО «Лукойл-Энергоинжиниринг»),  
доктор экономических наук, профессор,  
e-mail: zubakinva@gmail.com

### Information about the authors

**Katsay Alexander Vladimirovich**

Kinemak LLC,  
Candidate of Philosophical Sciences,  
e-mail: proton764@@mail.ru

**Zubakin Vasily Alexandrovich**

Gubkin Russian State University of Oil and  
Gas (NRU),  
Chair of (basic) Renewable Energy Sources  
(based on Lukoil-Energoengineering LLC),  
Doctor of Economics Sciences, Professor,  
e-mail: zubakinva@gmail.com