

Определение энергоёмкости бортового буферного конденсаторного накопителя энергии для городского электрического транспорта



А. В. Мятеж,
канд. техн. наук,
доцент кафедры
электротехнических
комплексов факультета
мехатроники
и автоматизации,
Новосибирский
государственный
технический университет



М. В. Ярославцев,
аспирант кафедры
электротехнических
комплексов факультета
мехатроники
и автоматизации,
Новосибирский
государственный
технический университет

Возможности экономии энергии при рекуперативном торможении на городском электрическом транспорте пока не используются в полной мере. Появление конденсаторов двойного электрического слоя (КДЭС) делает возможным создание эффективного бортового буферного накопителя энергии (БНЭ). Такие устройства позволяют повторно использовать энергию электрического торможения, реализовать автономный ход для преодоления препятствий небольшой протяженности и снизить нагрузку на систему тягового электроснабжения.

Применение КДЭС на городском электротранспорте в России

Устанавливаемые на современном подвижном составе городского электрического транспорта тяговые преобразователи позволяют осуществлять рекуперативное торможение в широком диапазоне скоростей, что обеспечивает возможность экономить электроэнергию. Эта возможность, однако, не используется в полной мере. Так, на троллейбусе вероятность рекуперации при существующей системе электроснабжения составляет 16–20 % [1]. Низкая вероятность рекуперации объясняется отсутствием в тяговой сети ГЭТ потребителей энергии достаточной мощности: необходимым условием для рекуперативного торможения является наличие подвижной единицы, находящейся в режиме тяги на общей с находящейся в режиме торможения единицей секции контактной сети.

Появление относительно дешёвых и компактных накопителей энергии – КДЭС – открывает перспективу создания эффективного бортового буферного накопителя энергии (БНЭ), запаасающего вырабатываемую при торможении энергию вместо возврата её в тяговую сеть. Такие устройства обеспечат повторное использование энергии электрического торможения вне зависимости от наличия внешних потребителей энергии.

При выборе величины буферного накопителя путем аналитических расчетов допускают предположение, что цикл движения между остановочными пунктами состоит из разгона, выбега и торможения [2]. Но в условиях крупных городов движение общественного транспорта затруднено и характеризуется как большим числом остановок на перегоне, так и необходимостью уменьшения скорости движения без полной остановки. В результате возрастает частота пусков и торможений, а ходовая скорость подвижного состава снижается. Таким образом, средняя энергия, вырабатываемая в процессе торможения, оказывается значительно меньше не только максимально возможной, рассчитанной в условиях торможения на спуске с полной загрузкой, но и энергии, оцененной в предположении соблюдения расчетного режима движения.

К настоящему времени в СНГ построено несколько образцов подвижного состава, так или иначе использующего КДЭС. Все они имеют накопительные устройства сравнительно большой энергоёмкости.

Так, опытный тяговый привод троллейбуса с буферизацией энергии, предложенный МЭИ в 2003 г., включал в себя накопитель энергоёмкостью 6 МДж [3].

Для троллейбуса БКМ-420 в качестве опции предлагается установка

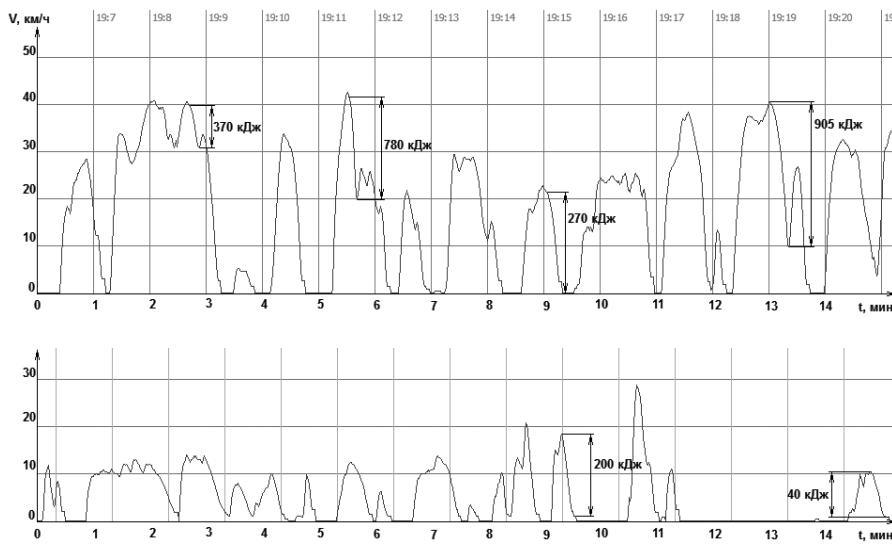


Рис. 1. Примеры записанных при помощи регистратора кривых движения троллейбуса: а) на свободной дороге; б) в заторе

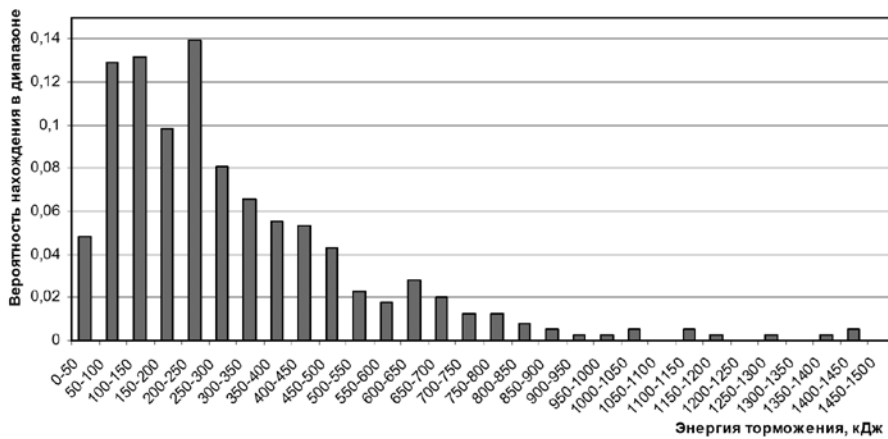


Рис. 2. Распределение величины кинетической энергии, рассеиваемой при торможении

конденсаторного накопителя, обеспечивающего автономный ход на расстояние до 5 км, что соответствует необходимой энергоёмкости около 10 МДж [4]. В то же время для объезда препятствий, как правило, достаточно способности к автономному передвижению на существенно меньшее расстояние. Так, комплекты электрооборудования, устанавливаемые на троллейбусы российского производства, включают свинцово-кислотный аккумулятор, обладающий на порядок меньшей энергоёмкостью и обеспечивающий дальность автономного хода до 500 м [5].

На автобусе Тролза-5250 «Экобус» и гибридном дуобусе, созданном МЭИ, конденсаторный накопитель помимо приема энергии накопления запасает энергию, вырабатываемую генератором и необходимую для движения с расчетной скоростью в наихудших условиях. Это обусловило применение

накопителей энергоёмкостью около 6 МДж.

Определение энергии торможения в реальных условиях

Для оценки возможной энергии торможения в реальных условиях авторами был изготовлен электронный регистратор режимов движения троллейбуса, фиксирующий показания спидометра с интервалом 0,5 с [6]. Регистратор был установлен на один из троллейбусов с импульсной системой управления, работающих в Новосибирске по маршруту, пересекающему центральную часть города. Запись велась в течение одной недели. В пиковые часы рабочих дней на части маршрута наблюдались заторы, в которых средняя скорость движения падала до 3–8 км/ч; в остальных случаях средняя скорость движения составляла 15–18 км/ч. На рис. 1 показаны примеры кривых движения троллейбуса в различных режимах.

По полученным записям были классифицированы режимы движения троллейбуса. Фрагменты записи с возрастающей скоростью отнесены к режиму тяги, а с резко возрастающим замедлением – к режиму торможения. Фиксировались количество пусков и торможений, а также разница скоростей начала и завершения торможения.

Установлено, что в среднем на километр пройденного пути приходится 3,5 остановки и совершается около 8 пусков и торможений, причём на свободной дороге число торможений составляет лишь 4–6 ед./км, а в заторах достигает 10–20 ед./км. Так как импульсная система управления позволяет произвольно выбирать силу тяги двигателя, водители предпочитают не использовать режим выбега при движении. Водители также предпочитают выполнять разгон и торможение с относительно низкими ускорениями (около 0,5 м/с²), не используя полную мощность двигателя.

Не во всех случаях торможение производится до полной остановки. Средняя скорость начала торможения составляет 23,2 км/ч, завершения – 6,7 км/ч, в то время как расчетные скорости начала торможения лежат в диапазоне 27–38 км/ч [2]. По величинам скоростей начала и окончания актов торможения для среднего значения массы троллейбуса и без учета влияния уклонов (что может быть допущено в условиях равнинного профиля) была оценена кинетическая энергия, поглощаемая при торможении. Распределение её по величине показано на рис. 2.

Результаты показывают, что в условиях крупного города с затрудненным уличным движением большая часть торможений происходит в диапазоне низких скоростей. Так как величина кинетической энергии пропорциональна квадрату скорости движения, то величина энергии, вырабатываемой при торможении, оказывается в 3–4 раза ниже ожидаемой, а число торможений – в 2–3 раза выше. С одной стороны, это означает снижение доли расходуемой подвижным составом энергии, которая могла быть сэкономлена в случае её повторного использования. Но, с другой стороны, создается возможность для значительного снижения энергоёмкости, а значит, и стоимости ВНЭ, что сократит срок его окупаемости.

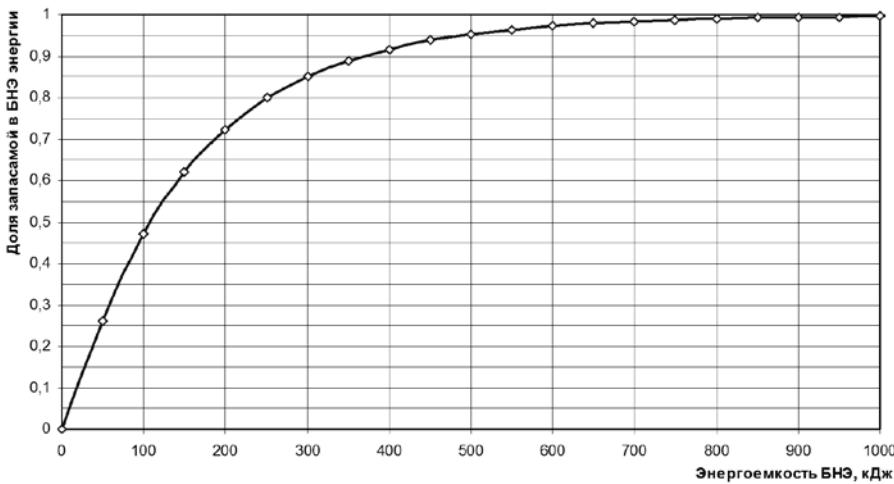


Рис. 3. Зависимость доли запасаемой энергии торможений от емкости БНЭ

Оценка срока окупаемости БНЭ

Если энергоемкость БНЭ ограничена, то он будет способен полностью принять энергию торможения, если её количество не превосходит это ограничение. При попытке передать накопителю большее количество энергии после достижения предельного напряжения на конденсаторе непринятая часть энергии будет рассеяна на реостатах, как это делается в настоящее время при невозможности рекуперативного торможения. Зная, как распределена энергия торможения, можно определить долю вырабатываемой при торможениях энергии α , которую БНЭ способен принять:

$$\alpha = \int_{E < E_{\text{БНЭ}}} p(E)dE + \int_{E > E_{\text{БНЭ}}} \frac{E_{\text{БНЭ}}}{E} p(E)dE,$$

где $p(E)$ – вероятность того, что энергия торможения примет значение E , а $E_{\text{БНЭ}}$ – ёмкость буферного накопителя энергии. Результат расчета показан на рис. 3.

Начиная с энергоемкости 300–500 кДж дальнейшее увеличение ёмкости БНЭ не приводит к существенному росту доли запасаемой в нём энергии. Действительно, чем выше энергия торможения и, соответственно, величина непринятой накопителем энергии, тем ниже вероятность торможения, при котором эта энергия могла бы быть выработана.

При некоторых допущениях можно приблизительно определить срок окупаемости буферного накопителя энергии для троллейбуса. Стоимость доработки тягового привода принята не зависящей от энергоемкости накопителя $C_{\text{ТЭП}} = 100$ тыс. руб. Она будет определяться, главным образом, стоимостью установки дополнительных силовых полу-

проводниковых приборов, необходимых для преобразования напряжения при передаче энергии между тяговым двигателем и накопителем. Стоимость конденсаторных накопителей составляет около $P_{\text{БНЭ}} = 1000$ руб./кДж. Принято также, что в условиях интенсивной эксплуатации годовой пробег троллейбуса достигает 60 тыс. км, а общая величина генерируемой в течение года при торможениях энергии $E_{\text{ГЕН}} = 35$ тыс. кВт·ч (125 тыс. МДж).

Величина экономии определяется стоимостью электрической энергии, запасаемой в накопителе за период его работы. Срок окупаемости БНЭ может быть найден как

$$T = \frac{C_{\text{ТЭП}} + E \cdot k \cdot P_{\text{БНЭ}}}{P_{\text{ЭЭ}} \cdot E_{\text{ГЕН}} \cdot \alpha(E) \cdot \eta}$$

где $P_{\text{ЭЭ}} = 2,5$ руб./кВт·ч – цена электрической энергии, $\alpha(E)$ – доля запасаемой в накопителе энергоемкостью E энергии, $k = 1,3$ – коэффициент избыточной ёмкости накопителя, $\eta = 0,75$ – КПД преобразования энергии.

Зависимость срока окупаемости от величины энергоемкости накопителя показана на рис. 4. Расчет показывает, что для троллейбуса, работающего в

описанном режиме движения, целесообразно принять полезную (без учета запаса) энергоемкость БНЭ E около 300 кДж, что обеспечит наибольшую экономию электрической энергии при сроке окупаемости в области минимальных значений. Накопитель такой энергоемкости будет являться достаточно компактным для установки на подвижном составе. Избыточная ёмкость накопителя необходима, так как ограничение по минимально допустимому напряжению не позволит полностью извлечь из него энергию.

Считая удельное сопротивление движению троллейбуса при малых скоростях движения $\omega = 12$ Н/кН [7], можно определить дальность автономного хода при заряженном накопителе энергии как

$$L = \frac{E}{Mg\omega} = \frac{300 \text{ кДж}}{15 \text{ т} \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 12 \frac{\text{Н}}{\text{кН}}} = 167 \text{ м},$$

где $M = 15$ т – средняя масса троллейбуса с пассажирами, g – ускорение свободного падения, E – энергоемкость БНЭ.

Особенности применения БНЭ на трамвае

Авторами не было выполнено исследование режимов движения трамвая. Тем не менее, предварительно можно сделать некоторые замечания об особенностях применения БНЭ на этом виде транспорта.

Наиболее распространённые в России четырёхосные трамвайные вагоны обладают массой и мощностью тяговых двигателей, приблизительно в 1,7 раза превосходящими массу и мощность двухосного троллейбуса. Следовательно, в случае схожих режимов движения величина энергии, вырабатываемой при торможении трамваем, будет также в 1,7 раза выше. При сохранении распределения скоростей начала и окончания торможения это потребует пропор-

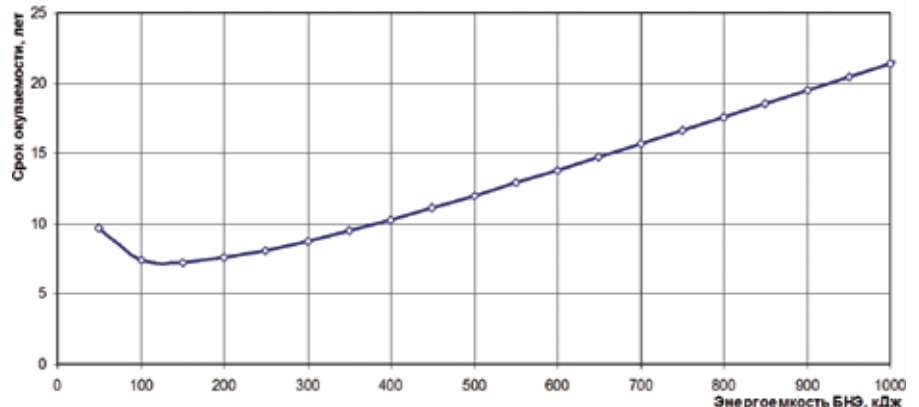


Рис. 4. Зависимость срока окупаемости БНЭ от величины его энергоемкости.

ционально увеличить и энергоёмкость БНЭ.

По статистическим данным для Новосибирска, средняя скорость движения и расход электрической энергии на километр пробега для трамвая и троллейбуса приблизительно одинаковы (около 15 км/ч и 2,5 кВт·ч/км в летнее время). Это означает, что хотя потребление энергии трамвайным вагоном при каждом пуске выше, чем у троллейбуса, среднее количество пусков и торможений на километр пробега у трамвая оказывается ниже, что может быть объяснено как меньшим сопротивлением движению, так и прохождением части путей на обособленном полотне, на котором не создаются помехи движению. Следовательно, при установке БНЭ на трамвае отношение количества сэкономленной в процессе работы энергии к энергоёмкости накопителя будет ниже, чем у троллейбуса, а срок его окупаемости окажется выше.

К настоящему времени техника достигла уровня, позволяющего создавать достаточно компактные и долговечные устройства, обеспечивающие накопление и повторное ис-

пользование большей части энергии торможений подвижного состава ГЭТ. Малое распространение накопителей объясняется, в первую очередь, экономическими причинами. Приведённые данные показывают, что снижение энергоёмкости накопителя позволяет повысить его эффективность и достичь разумных сроков окупаемости для БНЭ, устанавливаемых на подвижном составе троллейбуса. Можно также ожидать, что по мере роста стоимости электрической энергии, увеличения выпуска конденсаторов двойного электрического слоя и принятия мер по внедрению энергосберегающих технологий буферные накопители будут приобретать более широкое распространение. ■

Литература

1. Шулов Н. И., Сопов В. И., Прокушев Ю. А., Штанг А. А. Повышение эффективности использования электрической энергии в подсистеме электрического транспорта // Совершенствование технических средств электрического транспорта : сб. науч. трудов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. С. 6–20.

2. Штанг А. А. Повышение эффективности электротранспортных систем на основе использования накопителей энергии : дисс.... канд. техн. наук. Новосибирск, 2006.
3. Тяговый электропривод транспортного средства: интернет-портал МЭИ. [Электронный ресурс]. URL: http://mpei.ru/lang/rus/main/aboutuniversity/science/projects/project_93.pdf
4. Троллейбус модели 42003А: Белкоммунмаш. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.tdbkm.ru/index.php?area=1&p=static&page=tlb42003>
5. ПН 24-600НЛ (Блок автономного хода): НПФ АРС-Терм. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.npfarsterm.ru/produkcija/?id=22&item=10>
6. Мятаж А. В., Спиридонов Е. А. Специализированный цифровой самописец для исследования энергопотребления на городском электрическом транспорте // Науч. проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 2. С. 248–251.
7. Байрыева Л. С., Шевченко В. В. Электрическая тяга: городской наземный транспорт. М.: Транспорт, 1986. С. 40.



ЭлектроТранс 2014

Международная выставка

**ПРОДУКЦИЯ,
ТЕХНОЛОГИИ, УСЛУГИ
для предприятий
ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

Тематика:

- Инфраструктура городского электротранспорта
- Подвижной состав: комплектующие, ремонт, обслуживание
- Оснащение предприятий ГЭТ и метрополитенов
- Оборудование и технологии для служб электроснабжения
- АСКУЭ, технологии энергосбережения
- Электротехнические комплектующие
- Источники тока, инверторы, электродвигатели
- Путь и путевое хозяйство
- Информационные технологии для общественного транспорта

Оргкомитет:
Тел.: +7 (495) 287-4412, 276-2990
E-mail: info@electrotrans-expo.ru
[Http://www.mapget.ru](http://www.mapget.ru)

При содействии:



**27-29 мая
2014 года
Москва, ВВЦ**

В рамках выставки проводится обширная деловая программа: конференции, семинары, круглые столы, технические визиты

www.electrotrans-expo.ru

