

ЭНЕРГОНАКОПИТЕЛЬНАЯ РЕКУПЕРАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ГОРОДСКОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА НА БАЗЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ С СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ

*Вершинин Д.В., Смотров Е.А., Сусленко А.Ю., Фель А.М.,
ГП НТЦ «Станкосерт», Одесса*

Эта статья посвящена проблемам энергетической эффективности электрических транспортных средств и предлагает решение некоторых из них с помощью рекуперативного торможения. Благодаря его использованию кинетическая энергия движения электромобиля преобразуется в заряд суперконденсаторов при торможении, а затем запасенная энергия используется при ускорении. Применение энергонакопительной рекуперационной системы обеспечивает нам возможность контролировать процесс заряда и разряда аккумуляторной батареи и суперконденсаторов при торможении и разгоне соответственно. Использование этой технологии позволяет продлить срок службы батареи, увеличить пробег электротранспортных средств на одном цикле заряда, а также возможность более эффективно использовать энергию, что делает его более безопасным для экологии.

Ключевые слова: многодвигательное электротранспортное средство, электропривод мотор-колесо, суперконденсаторы, рекуперативное торможение, энергонакопительная рекуперационная система.

Введение. Перспективность применения автономного электропривода для городских транспортных средств (ТС) мало у кого вызывают сомнения. Это утверждение основывается не только на экологических аспектах, которые в будущем будут играть доминирующую роль в развитии городского транспорта и транспорта для закрытых территорий, но и на анализе энергетической эффективности электромобиля. В конечном итоге, электромобель практически в 2 раза эффективнее расходует энергию, по сравнению с традиционными ТС, приводимыми в движение двигателями внутреннего сгорания (ДВС). К этому необходимо добавить простоту конструкции ЭТС (отсутствие сложных механических узлов с большими затратами на трение), и, как следствие, низкую стоимость обслуживания электромобилей.

Постановка задачи. Современные решения в области электротранспорта при всех своих достоинствах имеют ряд недостатков, связанных с техническими ограничениями эксплуатации таких ТС, препятствующих их массовому внедрению в современные транспортные потоки. Одной из таких проблем является малый ресурс (относительно ресурса остальных узлов электротранспорта), дороговизна и недостаточно большая (с точки зрения средней дистанции пробега автомобиля в день, особенно что касается муниципального и обслуживающего транспорта) емкость аккумуляторной батареи (АБ) электротранспортного средства (ЭТС). (В тексте данной статьи под понятием АБ следует понимать LiFePO₄ батареи, но большинство сказанного в той или иной мере справедливо и по отношению к другим типам АБ).

Результаты исследований. Данная статья освещает основные характеристики и принципы работы энергонакопительной рекуперационной системы на базе суперконденсаторов, призванной решить некоторые из вышеуказанных проблем. В основе принципа работы этой системы лежит преобразование кинетической энергии движения ЭТС при торможении в электрическую энергию с накоплением последней в виде заряда импульсных суперконденсаторов и последующим его использованием при разгоне, именуемое рекуперативным торможением. Рекуперация сама по себе не является инновативной идеей, многие ТС, в том числе троллейбусы, трамваи и электровозы могут рекуперировать указанную энергию в сеть, если сеть обладает свойством обратимости. На ЭТС с автономным источником питания (АБ) не имеется такой возможности, следовательно, приходится рекуперировать энергию в АБ, но в таком режиме количество и скорость передачи энергии значительно превышают возможности АБ по «усвоению» (КПД заряда током $0,5C$ в среднем не превышает 60%) [1]; имеют место большие тепловые потери, которые, кроме очевидных недостатков, приводят к ускоренному износу батареи. В связи с этим является перспективным использование импульсных суперконденсаторов (СК) в качестве буферного накопителя рекуперированной энергии. Такие соображения основаны на характеристиках СК, обладающих малым внутренним сопротивлением и индуктивностью, малым током утечки (в сравнении с обычными конденсаторами), длительным сроком службы (вплоть до 30 лет), а также способностью за очень небольшие (в сравнении с АБ) промежутки времени эффективно принимать и отдавать большие количества энергии. Эффективное использование СК требует применения специального устройства, позволяющего управлять процессом заряда и разряда СК, уменьшая при этом пиковые токи АБ. Эту функцию и выполняет энергонакопительная рекуперационная система, схема включения которой приведена на рисунке 1.

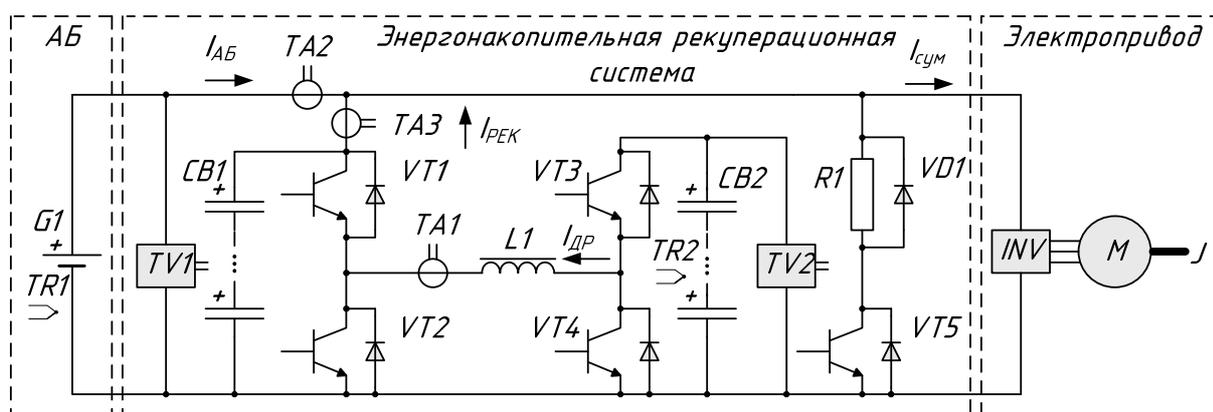


Рисунок 1 – Схема включения энергонакопительной рекуперационной системы в состав силового оборудования ЭТС:

G1 – силовая аккумуляторная батарея ЭТС; TA1, TA2, TA3 – датчики тока дросселя, АБ и рекуператора соответственно; TV1, TV2 – датчики напряжения АБ и СК; VT1, VT2, VT3, VT4, VT5 – силовые IGBT ключи;

СВ1 – емкостной блок подавления пульсаций в звене постоянного тока; СВ2 – батарея импульсных суперконденсаторов; L1 – силовой дроссель; R1 – шунтирующий (разрядный) резистор; VD1 – диод, шунтирующий всплески самоиндукции на паразитной индуктивности разрядного резистора; TR1, TR2 – датчики температуры АБ и СК.

Приведенная выше схема силовой части энергонакопительной рекуперационной системы рассматривается как контролируемый источник тока [2] и предоставляет такие возможности:

- накопление и хранение энергии торможения в СК путем коммутации VT1 (до уровня напряжения на АБ) и VT4 при полностью открытом VT1 (boost режим, позволяющий заряжать СК до напряжения в 2-3 раза выше напряжения АБ);
- отдача энергии при разгоне в электропривод для ограничения тока АБ, коммутируя VT3 (при уровне напряжения СК выше уровня АБ) и VT2 при полностью открытом VT3 после уменьшения напряжения на СК ниже уровня АБ;
- возможность шунтирования АБ резистором R1 путем коммутации VT5 для обеспечения защиты АБ от перенапряжений;
- как результат трех вышеуказанных функций, система позволяет стабилизировать токи заряда и разряда АБ, значительно уменьшает пиковые токи АБ;
- максимально токовая защита силовых элементов системы – транзисторов и дросселя;
- защита от перенапряжения АБ и СК;
- защита от перегрева.

Реализовать все эти возможности позволяет система управления, построенная на основе микроконтроллера. Взаимодействие силовой части и блока управления можно изобразить в виде структурной схемы, приведенной ниже.

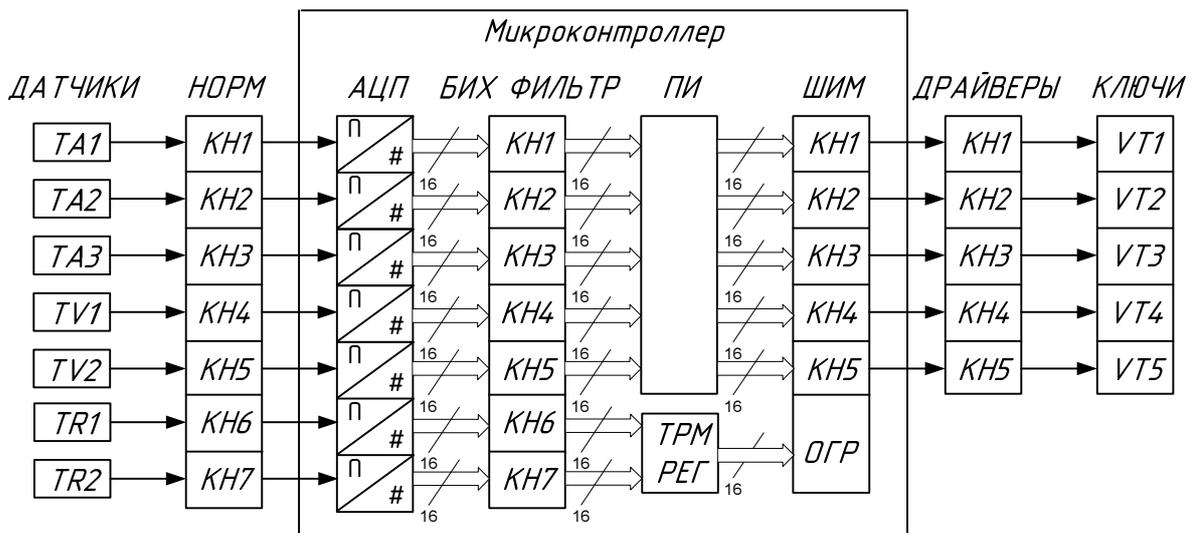


Рисунок 2 – Структурная схема взаимодействия силовой части и блока управления

Сигналы со всех датчиков поступают на соответствующие узлы нормирования, после чего они, уже приведенные к допустимым уровням, обрабатываются в АЦП на борту микроконтроллера с различной частотой опроса:

- токи АБ, дросселя и рекуператора (быстро меняющиеся параметры и также приоритетные для вычислений ПИ-регулятора) измеряются с частотой 500КГц, так как такая частота преобразования необходима для получения достаточно точной информации о состоянии системы и, как следствие, точной, быстродействующей системы регулирования;

- напряжения АБ и СК измеряем с частотой 80КГц (напряжение на СК и АБ меняются с меньшей, относительно токов, скоростью);

- сигналы с термодатчиков обладают значительной инерционностью по сравнению с вышеупомянутыми сигналами и поэтому их измерение производится с частотой обсчета системы 20КГц.

После преобразования цифровые данные поступают на цифровую обработку фильтрами с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ фильтрация), что в значительной мере способствует получению наиболее достоверных данных, уменьшая влияния различных помех: электромагнитной, шума, дискретизации и т.д. Параметры фильтров выбираются в соответствии с требованиями к качеству фильтруемых параметров и инерционности сигнала.

Отфильтрованные значения токов и напряжений поступают на вход ПИ регулятора, состоящего из двух последовательных звеньев:

- первое контролирует ток АБ и рекуператора, выбирает соответствующий режим в зависимости от величины стабилизируемого тока;

- второе получает задание с выхода первого звена и удерживает ток дросселя в заданных пределах.

Значения напряжений устанавливает ограничения на режимы работы силового модуля:

- при превышении допустимого уровня напряжения на СК (задаваемого производителем) система управления запрещает режим заряда СК, позволяя только разряжаться;

- в случае превышения допустимого уровня напряжения на АБ система управления инициирует коммутацию разрядного ключа VT5.

Данные о температуре используются для защиты системы в предельных условиях: в случае превышения температуры АБ или СК система управления, после предупредительного сигнала, полностью отключает коммутацию силовых ключей VT1-VT4. Такое радикальное решение связано с тем, что выход температурных показателей из диапазона свидетельствует о нарушении режима эксплуатации или выхода из строя оборудования и требует немедленного реагирования для предотвращения нанесения травм пассажирам, ускоренного износа или полной потери ресурса силовой установки ЭТС.

Ниже на рисунке 3 предложена структура регулятора, которая была реализована программными средствами на базе микроконтроллера. Как уже

говорилось, она содержит 2 подчиненных контура регулирования и один независимый. Рассмотрим более детально механизм их функционирования в различных режимах движения ЭТС.

В момент получения энергонакопительной рекуперационной системой разрешения на работу происходит самодиагностика и калибровка ее датчиков, по результатам которых производятся последующие действия. Если напряжение на конденсаторах отличается от номинального вследствие различных причин: длительного простоя ЭТС, недостаточно интенсивного предшествующего торможения, следует подзарядка суперконденсаторов до стандартного уровня. Эта операция производится для обеспечения возможности стабилизировать ток АБ в период движения с самого начала, вместо того чтобы ждать первого активного торможения, во время которого будет запасено достаточное количество энергии в СК. После выполнения подготовки система переходит в основной режим работы.

Как уже говорилось, рассматриваемое устройство является контролируемым источником тока и, соответственно, приоритетным источником задания режима работы является ток АБ, определяемый режимом работы электропривода. Необходимо сказать, что рекуператор призван компенсировать только динамическую составляющую тока потребления приводами ЭТС (статическая составляющая предполагает ток, который идет на преодоление статического момента ЭТС и определяется в начале движения – стартировании с места), а также позволяет АБ заряжаться номинальным (согласно документации на конкретную АБ) током при торможении. Таким образом, приняв полярность токов согласно обозначениям на рисунке 1 можно записать требуемый ток рекуператора в виде:

$$I_{\text{çàäüà}} = \begin{cases} I_{\text{ÄÄ}} - I_{\text{ñòäò}}, I_{\text{ÄÄ}} > 0 \\ I_{\text{ÄÄ}} + I_{\text{çäðýä}}, I_{\text{ÄÄ}} < 0 \end{cases} \quad (1)$$

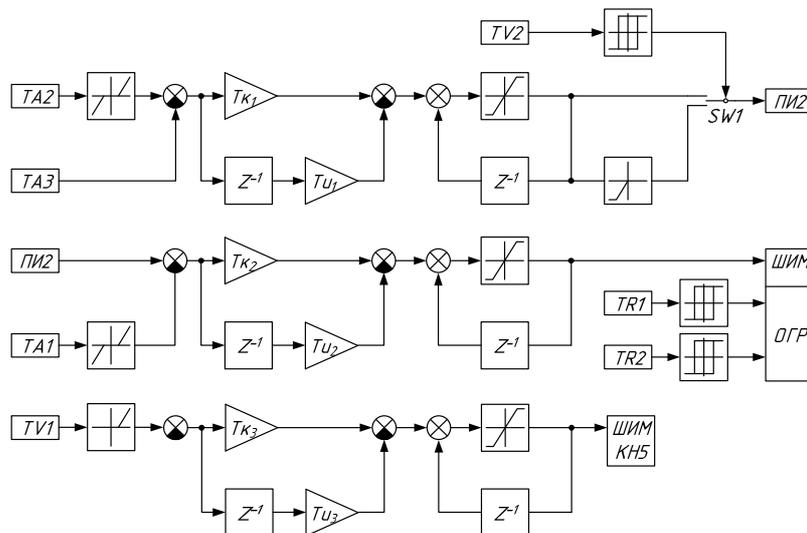


Рисунок 3 – Структура регулятора

На рисунке 3 видно, что в регуляторе это условие выполняется в виде мертвой зоны. Сигнал ошибки регулирования формируется при помощи сумматора, реализующего равенство:

$$x = I_{\text{с\ddot{a}\ddot{a}}} - I_{\text{Д\ddot{А}}} \quad (2)$$

Далее по структуре идут звенья, реализующие ПИ закон регулирования, соединенные с выходом, а также селектор режимов SW1, который по команде от датчика напряжения TV2 подключает выход к параллельной ветви, которая запрещает прохождение положительного сигнала ПИ на вход ПИ2, тем самым исключает возможность дальнейшего заряда СК до момента снижения показаний TV2 меньше нижнего порога.

Далее следует второе звено, на вход которого подается сигнал с выхода первого звена и с датчика тока дросселя. Второй сигнал, перед тем как попасть на сумматор, поступает на вход элемента мертвой зоны, что обеспечивает зону нечувствительности. Таким образом, реализуется механизм токоограничения – пока ток дросселя находится в пределах обозначенных как допустимые, он не вносит никаких коррекций в процесс регулирования, если же он вышел за мертвую зону – происходит вычитание сигнала задания и сигнала с датчика тока.

$$x = \begin{cases} \ddot{I}\ddot{E} \ 2, |I_{\ddot{A}\ddot{D}}| < dz \\ \ddot{I}\ddot{E} \ 2 - I_{\ddot{A}\ddot{D}}, |I_{\ddot{A}\ddot{D}}| > dz \end{cases} \quad (3)$$

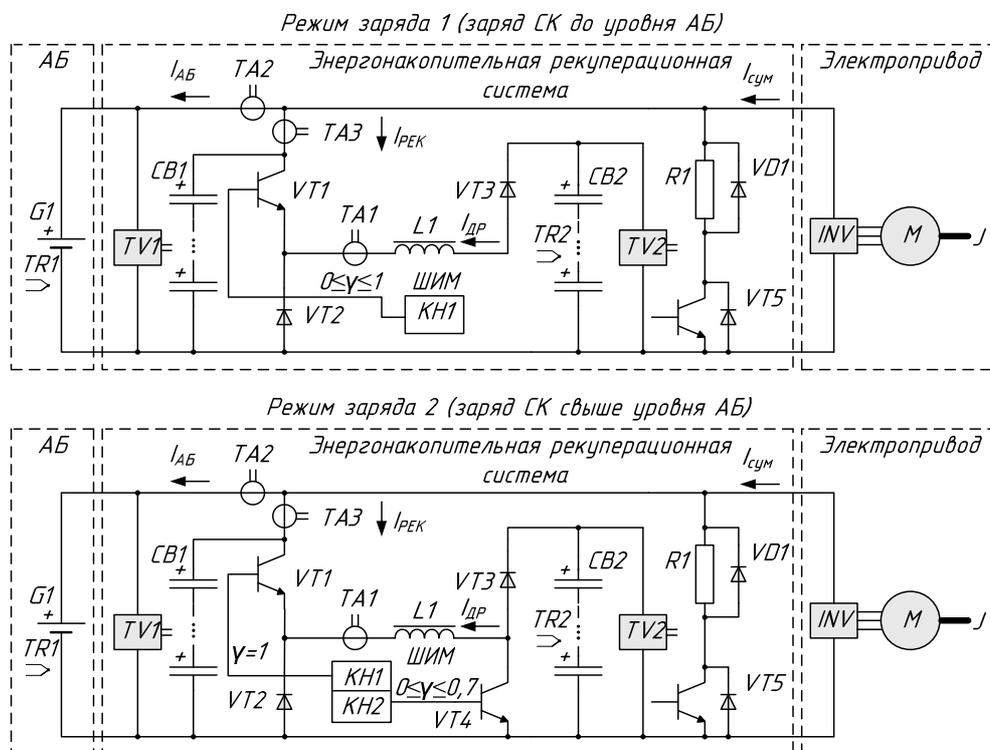


Рисунок 4 – Графическое отображение работы ключей при заряде (для легкости восприятия незадействованные элементы в текущем режиме упрощены)

За сумматором слують аналогічні передувачому блоку ПІ регулятора, виход якого з'єднаний з ШИМ модулятором каналів управління VT1-VT4, маючим також входи заперта роботи ШИМ і підключеними к ним через гістерезисні порогові елементи термодатчики. На вхід ШИМ модулятора поступає величина необхідної інтенсивності процесу заряду або розряду, в самому блоку модуляторе є набір логіки, який, в кінцевому ітогу, і реалізує механізм комутування силових ключей. Подробне графічне описання режимів заряду і розряду рекуператора представлено на рисунку 4 і рисунку 5 відповідно.

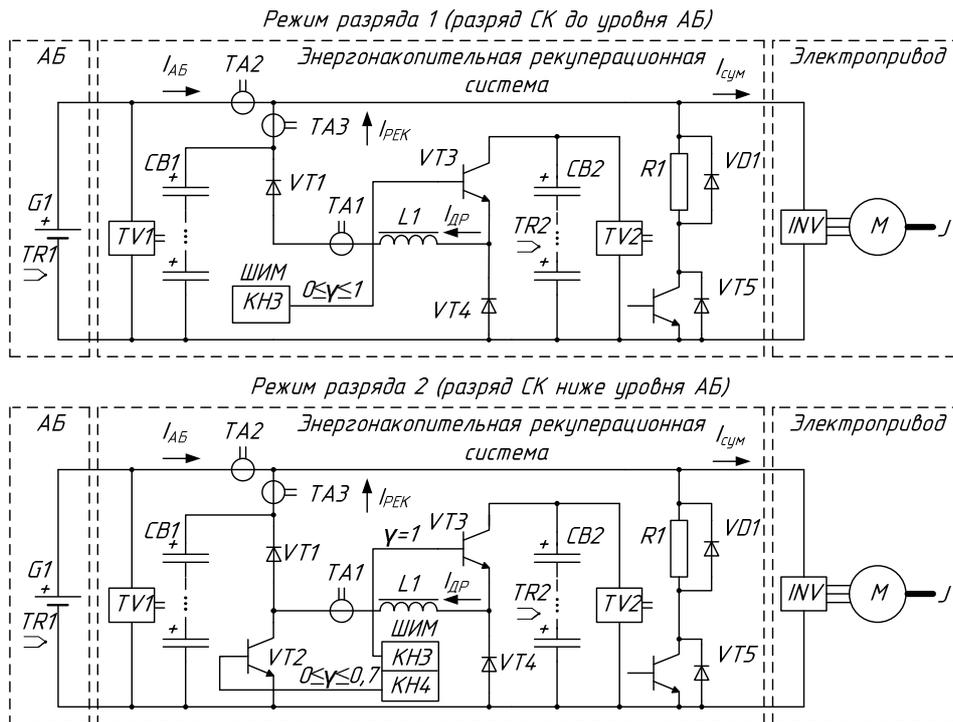


Рисунок 5 – Графічне зображення роботи ключей при розряді (для легкості сприйняття незадійствованні елементи в текущому режимі упрощені)

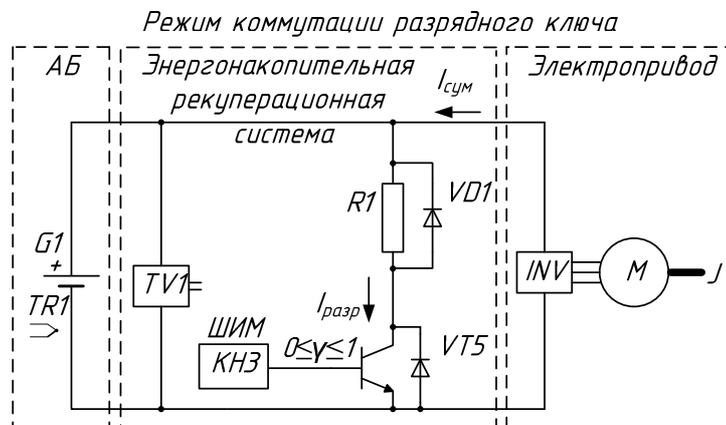


Рисунок 6 – Графічне зображення роботи розрядного ключа (не учасвуючі елементи системи для облегчення сприйняття не зображені)

Параллельно двум подчиненным контурам регулирования функционирует третий, отвечающий за независимое коммутирование разрядного ключа VT5 в случае превышения напряжения на АБ. Он, как два предыдущих контура, имеет зону нечувствительности для того чтобы не вмешиваться в процесс регулирования при нормальном напряжении АБ.

Наглядно функционирование рекуперационной системы в различных режимах представлено на рисунке 7.

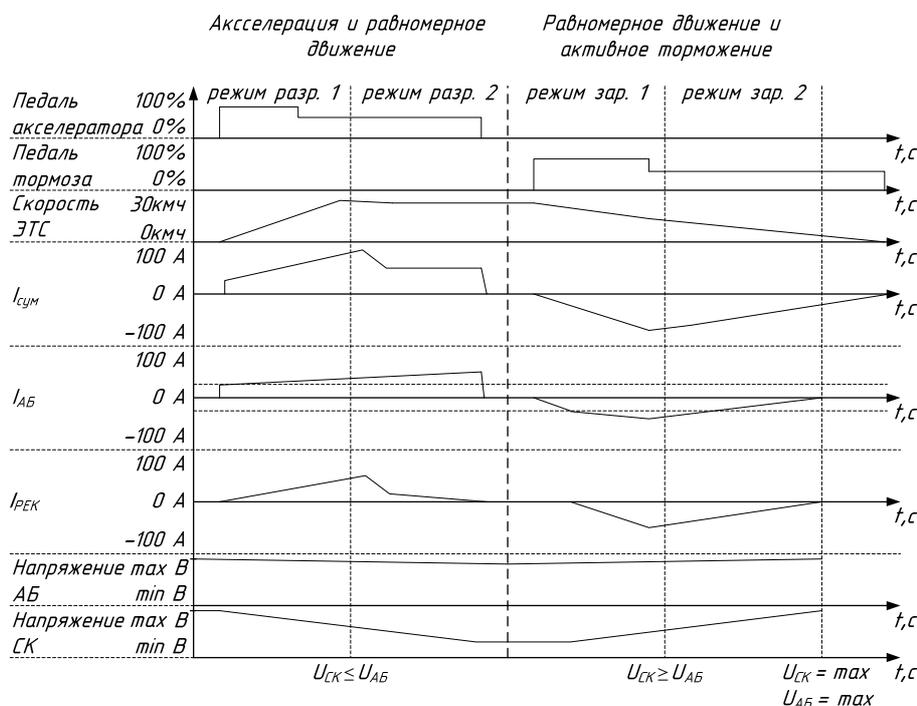


Рисунок 7 – Диаграмма предполагаемой работы ЭТС с интегрированной энергонакопительной рекуперационной системой:

- пунктирные линии вдоль оси $I_{АБ}$ обозначают уровень статической составляющей тока потребления электропривода и допустимый ток заряда АБ;
- вертикальные пунктирные линии обозначают переход системы в различные режимы работы.

Как видно из рисунка использование рекуперационной системы позволяет значительно снизить пиковое потребление тока АБ за счет наличия дополнительного энергетического балласта в виде СК, а также обеспечивает должный режим заряда.

Экспериментальные результаты. Результаты исследований нашли свое применение на легком электротранспортном средстве ЛЭТС, рассчитанном для передвижения 6 пассажиров (в грузовом варианте 500кг + водитель) на территориях санаториев, парков, рекреационных зон и т.д. Режим движения включает частые остановки и разгоны по различным типам покрытия: асфальту, грунтовой дороге, беговой дорожке, с большим количеством подъемов и спусков. Максимальная скорость 30 км/ч.

Дистанция пробега на одной подзарядке 100 км. Такие характеристики сформулировали определенные требования к силовому оснащению ЛЭТС:

- полный независимый привод по типу «мотор-колесо» [3] с электронным дифференциалом и различными режимами функционирования (активный, нормальный и экономичный режимы);

- достаточный запас и эффективное потребление энергии для длительного передвижения требуют присутствия емкой LiFePO₄ батареи на 60Ач [4] и энергонакопительной рекуперационной системы, особенно актуальной в применении на холмистой местности.

Конструкцией ЛЭТС также предусмотрен вариант размещения на крыше трех панелей солнечных батарей, общей мощностью ~400Вт, которые вместе с соответствующим контролером заряда за 5-6 часов хорошей погоды поставляют ~2кВтч электроэнергии, тем самым увеличивая длительность пробега на одной зарядке.



Рисунок 8 – Испытания ЛЭТС с демонтированной крышей.

Экономические показатели. Как уже упоминалось, энергонакопительная рекуперационная система (ЭРС) теоретически позволяет значительно увеличить срок эксплуатации батареи ЭТС. К моменту написания статьи мы еще не обладаем достаточным количеством собственной накопленной статистической информации о выигрыше в эксплуатационном ресурсе батареи, так как для этого необходимо проведение длительных испытаний в различных условиях эксплуатации, но ссылаясь на авторитетную информацию об эффективности похожих рекуперационных систем ведущих производителей ЭТС, увеличение срока эксплуатации может достигать 6 кратного размера для особо динамичных режимов. Учитывая тот факт, что стоимость батареи составляет около 30-40% стоимости всего ЭТС, то можно говорить о том что внедрение ЭРС позволяет значительно уменьшить расходы на эксплуатацию. Так же не менее важным является то, что применения рекуператора позволяет увеличить дистанцию пробега ЭТС до 20-30% в городском режиме (ECE 15), за счет снижения среднего расхода энергии с 85 Втч/км до 65 Втч/км, что в денежном эквиваленте составляет снижение цены за 1 км пробега с 0,031грн до 0,023грн при стоимости 1 КВтч равной 0,36грн.

Выводы. Опытная эксплуатация ЛЭТС подтвердила эффективность разработанной энергонакопительной рекуперативной системы на базе суперконденсаторов, позволяющей использовать 60-70% энергии торможения и исключить пиковые перегрузки АБ, чем достигается обеспечение максимальной длительности жизненного цикла АБ и увеличение дистанции пробега ЭТС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://afstrinity.com>
2. Смотров Е. А. Рекуператор бортового источника питания электротранспортного средства / Е. А. Смотров. – К. : «Техника». – 2010. – Вып. 78.
3. <http://inkar.mccinet.ru>
4. Вершинин Д. В. Особенности выбора параметров бортового источника питания электротранспортного средства / Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров // Электромашиностроение и электрооборудование. – К. : Техника. – 2008. – Вып. 71. – С. 5-11.

Вершинин Д.В., Смотров Е.О., Сусленко О.Ю., Фель О.М.
ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЛЬНА РЕКУПЕРАЦІЙНА СИСТЕМА ДЛЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ НА БАЗІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ З СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЄЮ

Ця стаття присвячена проблемам енергетичної ефективності електричних транспортних засобів і пропонує вирішити деякі з них за допомогою рекуперативного гальмування. Завдяки його використанню кінетична енергія руху електромобіля перетворюється в заряд суперконденсаторів під час гальмування, а потім збережена енергія використовується при прискоренні. Застосування енергонакопичувальної рекупераційної системи забезпечує нам можливість контролювати процес заряду і розряду акумуляторної батареї під час гальмування та розгону відповідно. Використання цієї технології дає змогу продовжити термін роботи батареї, збільшити пробіг електротранспортних засобів на одному циклі заряду, а також можливість більш ефективно споживати енергію, що робить його більш безпечним для екології.

Ключові слова: електротранспортний засіб з багатьма двигунами, електропривід мотор-колесо, суперконденсатори, рекуперативне гальмування, енергонакопичувальна система рекуперації.

Vershynin D.V., Smotrov Y.A., Suslenko A.Y., Fel A.M. ENERGY STORAGE RECUPERATIVE SYSTEM FOR CITY ELECTRIC VEHICLES BASED ON SUPERCAPACITORS AND SOLAR POWER PLANT

This article focuses on the problems of electric vehicle's energy efficiency and proposes to solve some of them by using recuperative braking. Due to it e-vehicle's kinetic energy of moving is stored in supercapacitors during braking and then the saved energy is used during acceleration. Use of energy storage recuperative system makes it possible to control the charging and discharging processes of the accumulator battery during braking and acceleration accordingly. Using this technology can extend battery life, mileage of e-vehicles on one charge cycle as well as use energy more effectively making it ecofriendly.

Key words: multimotor electric vehicle, engine-wheel electrical drive, supercapacitors, recuperative braking, energy storage recuperative system.