

УДК 255:29.1

РЕКУПЕРАТИВНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ
С СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ**В. Б. Клепиков, А. С. Гончар**Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61000, Украина. E-mail: gonchar.oleksandr.angler@gmail.com

Рассмотрена возможность и произведена оценка энергоэффективности использования суперконденсаторов в качестве буферных накопителей энергии при тормозных режимах электромотобиля. Расчетами и компьютерным моделированием установлено, что вклад в экономию энергоресурсов аккумуляторной батареи составляет до 60 % кинетической энергии электромотобиля перед каждым периодом торможения либо потенциальной энергии при продолжительных спусках.

Ключевые слова: электромотобиль, электропривод, суперконденсаторы, рекуперативные режимы.

РЕКУПЕРАТИВНІ РЕЖИМИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ
ІЗ СУПЕРКОНДЕНСАТОРАМИ**В. Б. Клепиков, О. С. Гончар**Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, г. Харків, 61000, Україна. E-mail: gonchar.oleksandr.angler@gmail.com

Розглянуто можливість і зроблено оцінку енергоефективності використання суперконденсаторів як буферних накопичувачів енергії при гальмівних режимах електромотобиля. Розрахунками і комп'ютерним моделюванням встановлено, що внесок в економію енергоресурсів акумуляторної батареї становить до 60 % кінетичної енергії електромотобиля перед кожним періодом гальмування або потенційної енергії при тривалих спусках.

Ключові слова: електромотобиль, електропривод, суперконденсатори, рекуперативні режими.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. По мнению мировых экспертов, в ближайшее десятилетие в автомобилестроении начнется массовый переход от двигателей внутреннего сгорания к электроприводу. Помимо экономии органических ресурсов, это позволит добиться улучшения экологической обстановки в крупных городах, повысить комфортность движения. Электропривод обеспечивает создание тормозных усилий не за счет потерь энергии в тормозных устройствах, что сопряжено также с их износом, а за счет тормозного электромагнитного момента. Одним из видов тормозных режимов электропривода является режим рекуперативного торможения, при котором обеспечивается возврат кинетической энергии, запасенной электромотобилем, источнику электрической энергии, используемый впоследствии для движения электромотобиля. При спуске электромотобиля создание тормозящего усилия также сопровождается передачей источнику преобразованной электроприводом в электрическую потенциальной энергии, пропорциональной перепаду высоты. Организация рекуперативных режимов при остановках и при спусках увеличивает запас хода электромотобиля на одном заряде. Данное обстоятельство весьма важно, т.к., по исследованиям консалтинговой компании Oliver Wyman, лишь 13 % автовладельцев готовы смириться с пробегом меньше 250 км [1].

Практическая реализация рекуперативных режимов в электромотобиле связана с определенными сложностями. Литий-ионные аккумуляторные батареи (АКБ), способные воспринимать большие зарядные токи (до 100 А и более), весьма дороги и, кроме того, подобные режимы существенно сокращают срок их службы. В [2] также отмечается, что цена литий-ионных батарей по отношению к цене всего электромотобиля такова, что замена после окончания срока службы становится нерентабельной. Для Украины, не имеющей

собственного производства литий-ионных аккумуляторов, испытывающей недостаток нефтяных ресурсов, с экологией больших городов, отягощенной выхлопными газами все возрастающего числа автомобилей, весьма актуален переход к электромотобилем путем модернизации автомобилей силами отечественных производителей.

Целью настоящей работы является оценка энергоэффективности и целесообразности разработок электропривода электромотобиля с традиционными свинцово-кислотными аккумуляторами и буферной батареей супер-конденсаторов на примере схемы, представленной для патентования кафедрой «Автоматизированные электромеханические системы», НТУ «ХПИ», для условий городского цикла движения, определенных стандартом ЕСЕ-15.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

В качестве тягового электродвигателя используется двигатель постоянного тока смешанного возбуждения, что позволяет организовать рекуперативное торможение по достаточно простой схеме. Упрощенная схема, поясняющая процессы заряда СКБ при рекуперативном торможении, приведена на рис. 1.

Работа преобразователя в режиме рекуперативного торможения осуществляется по принципу повышающего импульсного регулятора напряжения, в котором в качестве накопителя электромагнитной энергии используется индуктивность якорной цепи двигателя, а нагрузкой выступает суперконденсаторная батарея (СКБ). Ее емкость C вычисляется по закону сохранения энергии из условия, что принятая супер-конденсаторной батареей (СКБ) электрическая энергия равна отданной кинетической и потенциальной за вычетом энергии, потраченной за время рекуперации на преодоление сил сопротивления движению электромотобиля:

$$C \geq \frac{(m + m_d)(V_n^2 + V_k^2) + 2mg\Delta h - 2 \int_0^S (F_{tr} + F_v(V)) dS}{U_{max}^2 + U_{min}^2} \eta_p, \quad (1)$$

где m – масса автомобиля; m_d – приведенный к поступательному движению момент инерции вращающегося якоря электродвигателя; V_n и V_k – начальная и конечная скорость автомобиля, соответственно; g – ускорение свободного падения; Δh – изменение высоты; F_{tr} – сила трения качения колес о дорогу; $F_v(V)$ – сила сопротивления воздуха; S – координата пути; S_T – тормозной путь; U_{min} , U_{max} – минимальное и максимальное значение напряжения на СКБ (зависят от схемы электропривода и напряжения питания электродвигателя); η_p – КПД преобразователя.

В [5] выполнен многосторонний анализ суперконденсаторов и отмечены как достоинства, так и недостатки использования их в автономном аккумуляторном электротранспорте. Учитывая непрерывное совершенствование технологии производства СКБ, представляется целесообразным продолжать их исследование и поиск путей использования.

Расчеты электропривода мощностью 36 кВт для переоборудования, переданного кафедре «АЭМС» в учебно-научных целях автомобиля Lanos, показали, что СКБ, способная накопить 235 кДж, имеет вес 15 кг [3], что составляет не более 5% от общего веса тяговой аккумуляторной батареи. Такой СКБ достаточно, чтобы автомобиль массой 1500 кг (что соответствует снаряженной массе автомобиля на базе Lanos) мог спуститься с постоянной скоростью с высоты 30 м или затормозить со скорости 85 км/ч до полной остановки.

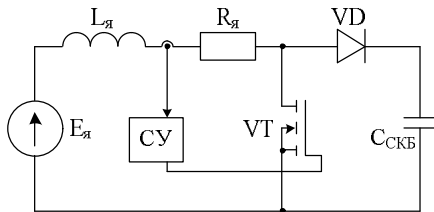


Рисунок 1 – Упрощенная схема рекуперативного торможения автомобиля

В соответствии с регулировочной характеристикой повышающего импульсного преобразователя напряжения без учета потерь [4]:

$$U_c = \frac{E}{1-D}, \quad (2)$$

где U_c – напряжение на СКБ; E – ЭДС двигателя; D – относительная длительность включения транзистора.

Для обеспечения постоянства тормозного момента система имеет ПИ-регулятор тока, ключ VT работает в режиме ШИП, задание тормозного тока поступает с электронной части педали тормоза.

Для разделения СКБ от основной аккумуляторной батареи было рассмотрено два различных способа, показанных на рис. 2.

При разработке электропривода для учебно-лабораторного образца электроавтомобиля было отдано предпочтение более простому варианту (рис. 2,б), что позволяет избежать добавления в схему дополнительных силовых ключей и усложнения алгоритма управления. Однако в этом случае требуется больше емкость СКБ.

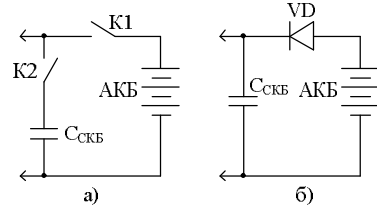


Рисунок 2 – Способы подключения суперконденсаторов к основной батарее.

Для оценки влияния рекуперативного торможения на запас хода автомобиля в условиях городского цикла движения (ЕСЕ-15) и работоспособности схемы была создана компьютерная модель электропривода автомобиля в программе Matlab, а также лабораторный стенд мощностью 0,5 кВт. Компьютерная модель учитывала внутренние сопротивления СКБ и АКБ, момент сопротивления движению включал в себя влияние сил трения, а также учитывал зависимость силы сопротивления воздуха от скорости движения автомобиля.

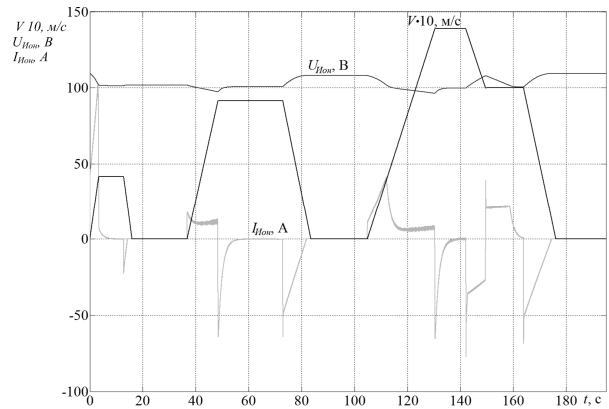


Рисунок 3 – Временные диаграммы компьютерного моделирования

На рис. 3 представлены результаты компьютерного моделирования движения автомобиля по горизонтальному участку, свидетельствующие о полном соответствии полученных временных диаграмм физической сущности протекающих процессов. В процессе разгона происходит заряд СКБ и к его окончанию при скорости 4,2 м/с напряжения СКБ и АКБ сравнялись, а автомобиль был переведен в режим установившегося движения.

Повторный старт ($t=38$ с) происходит при почти равных напряжениях на АКБ и СКБ. Однако вследствие падения напряжения на внутреннем сопротивлении АКБ от пускового тока имеет место превышение напряжения СКБ над напряжением АКБ, в результате чего СКБ подпитывает ток электро-

двигатель, что сопровождается ее разрядом. Снижение пускового тока после окончания разгона повышает значение напряжения на зажимах АКБ, создавая условия $U_{\text{АКБ}} > U_{\text{СКБ}}$, в результате чего происходит скачкообразный (с затуханием) процесс подзаряда СКБ. Так как разгон произведен до большей скорости ($V=9$ м/с), напряжение на СКБ после торможения оказывается выше, чем в первом случае. Временная диаграмма на этапе движения со 105 по 175 с, с точки зрения физической сущности и в количественном сопоставлении с предыдущими этапами, согласуется с вышеприведенными пояснениями.

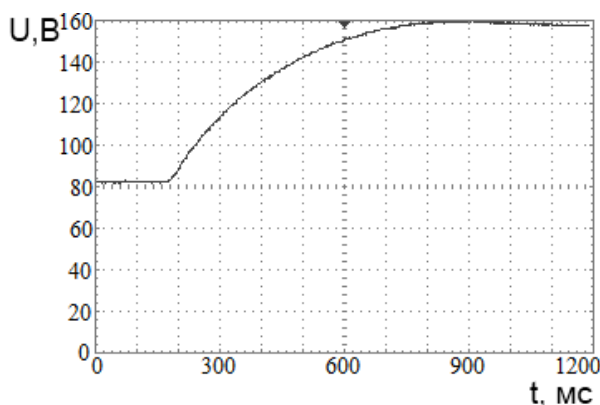


Рисунок 4 – Оциллограмма напряжения на батарее конденсаторов при рекуперативном торможении

На рис. 4 представлена оциллограмма напряжения на батарее конденсаторов, иллюстрирующая возможность использования индуктивности якорной цепи электродвигателя как накопителя электромаг-

нитной энергии для осуществления рекуперативного режима и подтверждающая возможность использования конденсаторных накопителей энергии в тор- мозных режимах электромобиля.

ВЫВОДЫ. Использование конденсаторных батарей как буферных накопителей электрической энергии, возвращаемой электромобилем в режимах торможения, оправдано с точки зрения энергоресурсосбережения и относительно несложно реализуемо схемно. Расчетно приемлемые параметры таких накопителей обеспечиваются построением их в виде суперконденсаторных батарей. Для практической реализации электроприводов с СКБ необходимо их непосредственное исследование в реальных условиях работы электропривода электромобиля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаранжа А. Oliver Wyman: электромобили и через 15 лет будут стоить дороже обычных – Режим доступа: <http://www.3dnews.ru>.
2. Hrach D., Cifrain M. Batterietechnik und – management im Elektrofahrzeug // *Elektrotechnik & Informationstechnik*. – 2011. – 128/1–2. – PP. 16–21.
3. Каталог продукции компании Yunasko. Режим доступа: http://www.yunasko.com/index.php?option=com_content&view=article&id=83&Itemid=105&lang=en
4. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. – М.: Техносфера, 2005. – 235 с.
5. Шидловский А.К., Павлов В.Б., Попов А.В. Применение суперконденсаторов в автономном аккумуляторном электротранспорте // *Технічна електродинаміка*. – 2008. – № 4. – С. 43–47.

RECUPERATIVE ELECTRIC DRIVE MODES OF THE ELECTROMOBILE WITH SUPERCAPACITOR

V. Klepikov, O. Gonchar

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"

ul. Frunze, 21, Kharkov, 61000, Ukraine. E-mail: gonchar.oleksandr.angler@gmail.com

Considered feasibility and evaluated the supercapacitors efficiency as buffer energy storage with electric braking mode. Calculations and computer simulations found that the contribution to energy saving battery up to 60% of electromobile kinetic energy before each braking period or potential energy with long downhill.

Key words: electric vehicle, electric drive, supercapacitors, recuperative mode.

REFERENCES

1. A. Garanzha. *Oliver Wyman: electric vehicles and 15 years will cost more than usual*. – Mode of access: <http://www.3dnews.ru>. [in Russian]
2. D. Hrach, M. Cifrain *Batterietechnik und – management im Elektrofahrzeug // Elektrotechnik & Informationstechnik*. – 2011 – Iss. 128/1–2. – PP. 16–21.
3. Yunasko product catalogue. – Mode of access: http://www.yunasko.com/index.php?option=com_content&view=article&id=83&Itemid=105&lang=en
4. Melyoshin V. I. *Transistor converter technology*. – М.: Technosfera, 2005. – 235 p. [in Russian]
5. Shidlovsky A.K., Pavlov V.B., Popov A.V. Use ultracapacitors in the autonomous battery electric transport // *Tehnichna elektrodinamika*. – 2008. – № 4. – PP. 43–47. [in Russian]

Стаття надійшла 10.07.2012.
Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Садовим О.В.