

ляется выбор оптимальных характеристик круга в каждом конкретном случае обработки, обеспечиваю-

щих снижение интенсивности трения связки круга с обрабатываемым материалом.

### Литература

1. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с.
2. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов [Текст] / А.Н. Резников. – М.: Машиностроение, 1981. – 279 с.
3. Сипайлов В.А. Тепловые процессы при шлифовании и управление качеством поверхности [Текст] / В.А. Сипайлов. – М.: Машиностроение, 1978. – 166 с.
4. Теоретические основы резания и шлифования материалов: учеб. пособие [Текст] / А.В. Якимов, Ф.В. Новиков, Г.В. Новиков, Б.С. Серов, А.А. Якимов. – Одесса: ОГПУ, 1999. – 450 с.
5. Новиков Ф.В. Теоретический анализ условий повышения качества обработки по температурному критерию [Текст] / Ф.В. Новиков, И.А. Рябенков // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка. – Х.: ХНТУСГ, вип. 61, 2007. – С. 164-171.
6. Робочі процеси високих технологій в машинобудуванні: навч. посібник [Текст] / За редакцією А.І. Грабченко – Х.: ХДПУ, 1999. – 436 с.

*Приведені результати досліджень основних характеристик тягової системи електромобіля (ЕМ) із застосуванням суперконденсаторів (СК) на етапах старту та розгону, подальшого енергоживлення від акумуляторної батареї (АКБ)*

*Ключові слова: акумуляторна батарея, суперконденсатор, електромобіль, потужність*

*Приведены результаты исследований основных характеристик тяговой системы электромобиля (ЭМ) с применением суперконденсаторов (СК) на этапах старта и разгона, последующего энергопитания от аккумуляторной батареи (АКБ)*

*Ключевые слова: аккумуляторная батарея, суперконденсатор, электромобиль, мощность*

*The results of investigations of the main characteristics of the traction system of the electric motorcar (EM) with application of supercapacitors (SC) at the stage of EM starting, acceleration and subsequent accumulator battery (AB) energy supply are given*

*Keywords: accumulator battery, supercapacitor, electric motorcar*

УДК 629.113.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ АКБ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРА В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ

**Н.И. Слипченко**

Доктор физико-математических наук, профессор\*  
Контактный тел. (0572) 702-10-20

**В.А. Письменецкий**

Кандидат технических наук, профессор\*  
Контактный тел. (0572) 702-13-43

**М.Ю. Гуртовой**

Аспирант  
Контактный тел. (0572) 702-13-43

\*Кафедра микроэлектроники, электронных приборов и устройств

Харьковский национальный университет радиозлектроники  
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

### Введение

В настоящее время в связи с непрерывным ростом цен на нефть и продукты нефтепереработки в мире возросла популярность электромобилей. Спросу на этот вид транспорта способствует и то, что в условиях города

современный автомобиль реализует от 5 кВт до 20 кВт мощности двигателя. Поэтому городской автотранспорт целесообразно заменить на электромобили. Эксперты также утверждают, что при переходе на электромобили уровень выбросов углекислого газа снизится в США с 198 до 167 г/км и в Японии с 180 до 140 г/км [1].

По оценкам специалистов предполагается к 2020 г. довести количество электротранспортных средств на улицах немецких городов до 1 млн. В связи с увеличивающейся распространенностью электротранспорта уменьшение расхода энергии становится важным аспектом исследования автомобильной промышленности. Кроме этого важным фактором является увеличение времени пробега до очередной подзарядки. Одним из вариантов решения этих проблем является совместное применение в тяговой системе электромото-биля АКБ и СК, а также оптимизация их временных циклов работы с целью уменьшения энергозатрат.

**Анализ состояния разработок электромобилей и задачи исследований**

Анализ основных характеристик электромобилей, приведенных в табл. 1, позволяет сделать вывод, что одним их существенным недостатком является большое время подзарядки.

**Таблица 1**

**Характеристики электромобилей**

Марка электромото-биля	Дальность пробега, км	Время разгона от 0 до 100 км/ч, с	Максимальная скорость, км/ч	Время подзарядки, ч
BlueOn	140	13,1	130	6
E-Cell	200	14	150	8
Toyota RAV4 EV	160 - 180	10	120	5

В результате моделирования на основе физико-аналитических моделей АКБ [2] стандартного цикла движения ЭМ по городу показано, что относительно большая доля энергии (от 16 % до 48 %) затрачивается на разгон ЭМ и, примерно, по 17-18% - на преодоление сопротивления качения, аэродинамического сопротивления, и на потери в тяговом электроприводе. В связи с этим, актуальной становится задача по оптимизации использования источников энергии при разгоне и движении по городу ЭМ.

В последнее время появилась альтернатива АКБ — суперконденсаторы (СК). По удельной энергии они хуже литиевых АКБ почти на порядок (табл. 2), но их отличительной особенностью является быстрая зарядка, что определило их широкое применение при проектировании ЭМ [3]. В этом случае СК подключаются параллельно аккумуляторам и их выгодней использовать для покрытия импульсных нагрузок, а для продолжительной работы предпочтительней источник питания на основе АКБ. Работоспособность СК сохраняется при низких и очень низких температурах, в то время как для АКБ она резко падает. Примером применения СК является конденсаторный 41-местный китайско-американский автобус Ultracap Bus со скоростью 48 км/ч и запасом хода менее 8 км, что существенно меньше, чем при использовании АКБ [1]. СК выгодно ставить и при обычных бензиновых двигателях, с использованием системы «Старт-стоп».

Обычные АКБ позволяют экономить около 10% топлива, а «старт-стопы» на СК – до 30-40%.

Сравнительная оценка энергетических параметров АКБ и СК (табл. 2) показывает, что:

1) АКБ обеспечивают накопление больших объемов энергии более 100 кДж/кг, но имеют ограничения по току или по импульсной (пиковой) мощности (0,2 кВт/кг).

2) Суперконденсаторы способны выделять в импульсе большую пиковую мощность (до 80 кВт/кг), но имеют относительно малый запас энергии [3, 4].

3) Оптимальная структура энергообеспечения электромото-биля возможна при условии рационального соотношения запасаемой энергии и расходуемой мощности между АКБ и СК.

**Таблица 2**

**Сравнительная оценка энергетических параметров АКБ и СК**

Тип источника	Основные параметры			
	Удельная энергия, кДж/кг	Удельная мощность, кВт/кг	Срок службы, циклы / время экспл., годы	Время зарядки, ч, с
АКБ	> 100	< 1	200-500/3	6 - 8 ч
СК	1 - 30	1 - 80	10 <sup>6</sup> -10 <sup>8</sup> /3-12	30 - 240 с

Таким образом, проблема заключается в поиске компромиссного режима работы системы энергопитания ЭМ, который позволил бы реализовать преимущества АКБ и СК систем, обеспечил минимизацию энергопотребления и максимальную дальность пробега до очередной подзарядки. Для этого необходимо оптимально и оперативно перераспределять энергопитание электродвигателя (ЭД) между СК и АКБ при рациональном соотношении между основными параметрами этих источников (удельная энергия и удельная мощность).

Целью работы является разработка комбинированной системы энергопитания ЭМ, основанной на совместном использовании АКБ и СК, с микроконтроллерным управлением режимов ее работы. Предлагаемой системой энергопитания целесообразно оснащать ЭМ с малой скоростью движения (40 - 50 км/ч) и электродвигателем малой мощности (от 5 до 20 кВт) для использования в черте города, как экологически чистый общественный, так и индивидуальный транспорт. Выполненный краткий обзор состояния разработок ЭМ позволяет сформулировать следующие основные задачи исследований:

- Анализ состояния разработок электромобилей и задачи исследований
- Анализ и исследование основных характеристик электромото-биля
- Анализ разрядных характеристик АКБ
- Исследование параметров суперконденсаторов
- Исследование динамики совместного применения АКБ и СК
- Проектирование и разработка микроконтроллерной системы управления режимами работы АКБ и СК

**Основные результаты исследований**

**Анализ и исследование основных характеристик электромобиля**

Одним из главных параметров электромобиля является его динамика – способность быстро набирать скорость и тормозить.

Процесс разгона электромобиля до номинальной скорости зависит от следующих основных характеристик: массы электромобиля, времени разгона, аэродинамических характеристик корпуса, мощности электродвигателя, пикового тока АКБ, емкости пускового конденсатора (СК). Применяя известную методику расчета тяговой системы ЭМ [5] получены зависимости пиковой мощности ЭМ на этапе разгона в зависимости от его массы и времени разгона, представленные на рис.1. Из рис. 1 следует, что пиковая мощность ЭМ на этапе разгона при прочих равных условиях обратно пропорциональна времени разгона и прямо пропорциональна массе ЭМ.

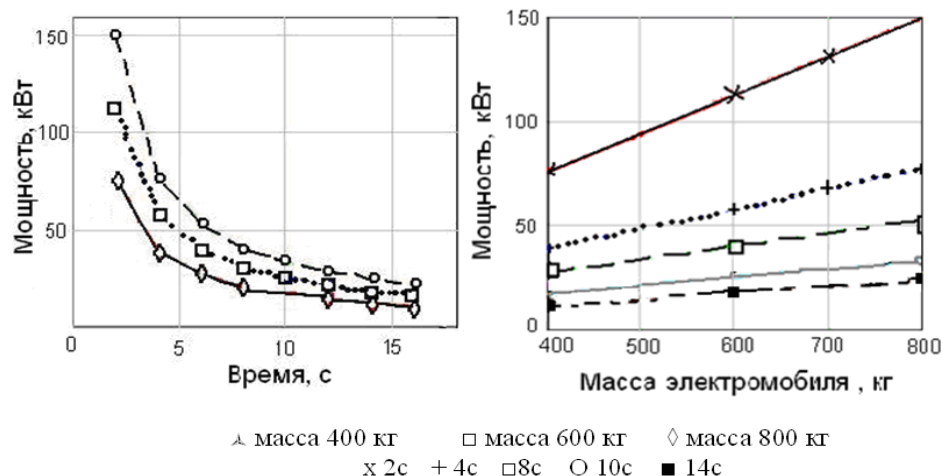


Рис.1. Графики пиковой мощности для разного времени разгона

Для проведения исследования компонентов (АКБ и СК) тяговой системы ЭМ, их совместного применения, а также разработки микроконтроллерной (МК) системы управления этой системой был спроектирован и создан аппаратно-программный измерительный стенд с визуализацией результатов на экране ПК.

**Анализ разрядных характеристик АКБ**

Были исследованы разрядные характеристики для свинцово-кислотной АКБ типа VIPOW BAT0211 с напряжением 12 В и номинальной емкостью 7 Ач при нагрузках 3, 6 и 9 Ом (рис.2). Из графиков следует, что с увеличением токовой нагрузки в 3 раза (с 1,4 А до 4,2 А) существенно сокращается продолжительность разрядного цикла АКБ, что определяет соответствующее уменьшение времени пробега.

При оценке мощностных возможностей АКБ следует учитывать, что с ростом токовой нагрузки с учетом механизма ионной проводимости, исследованной в 1897 г. Пекертом, уменьшается реальная отдаваемая мощность [2, 3], для оценки которой можно использовать соотношение:

$$P_{\max \text{ АКБ}} = U_{\min} I_p, \tag{1}$$

где  $I_p$  – максимальный ток разряда,

$$I_p = \frac{(U_{\text{ном}} - U_{\min})}{r}; U_{\text{ном}} \text{ – номинальное напряжение}$$

АКБ;  $U_{\min}$  – минимальное напряжение АКБ;  $r$  – внутреннее сопротивление АКБ [3, 6].

Результаты расчетов значений реальной выходной мощности АКБ типа VIPOW BAT0211 при различных токовых нагрузках и времени работы приведены в табл.3.

Таблица 3

**Характеристики АКБ**

Время, ч	20	10	5	1
Разрядный ток, А	0,35	0,665	1,17	4,2
Реальная мощность, Втч	84	79,8	70,56	50,4
Реальная емкость АКБ, Ач	7	6,65	5,88	4,2

Из табл.3 можно сделать вывод, что с увеличением токовой нагрузки от 0,35 А до 4,2 А реальная емкость АКБ уменьшается от 7 Ач до 4,2 Ач, что приводит к снижению выходной энергии от 84 Втч до 50,4 Втч.

**Исследование параметров суперконденсаторов.**

Для анализа процесса зарядки СК от источника постоянной ЭДС через сопротивление  $R$  можно использовать известные соотношения:

$$R \Delta J = -\left(\frac{1}{C} \Delta Q\right); \frac{\Delta J}{\Delta t} = -\left(\frac{1}{RC}\right)J, \tag{2}$$

где  $C$  – емкость СК,  $Q$  – накапливаемый заряд [7].

Для оценки времени заряда  $T_3$  будем считать, что заряд  $Q$  возрастает с постоянной скоростью, рав-

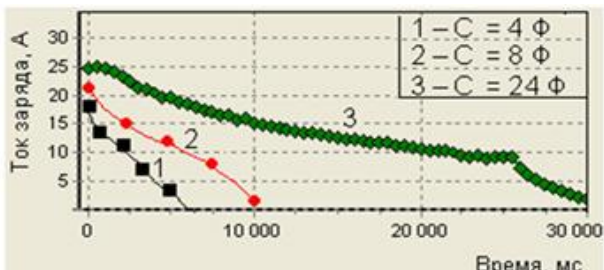
$$\text{ной току } J_0. \text{ Тогда } T_3 = \frac{Q}{J_0} = RC.$$

Результаты исследований зарядных характеристик СК разных емкостей приведены на рис.3 а и 3 б соответственно и в табл. 4 для  $R = 1$  Ом и напряжения источника 12 В.

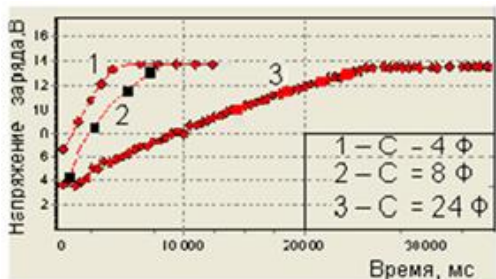
Таблица 4

**Постоянная времени СК разной емкости**

Емкость $C$ , Ф		4	8	24
Постоянная времени $RC$ , с	Измеренная	5	7,5	26
	Расчетная	4	8	24
Ток заряда, А		18,5	21,5	25

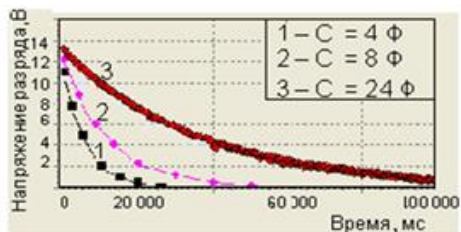


а)

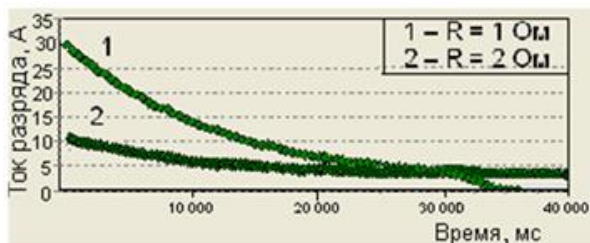


б)

Рис. 3. Графики напряжений (а) и токов заряда (б) для разных С



а)



б)

Рис. 4. График напряжений (а) и токов разряда (б)

Как следует из табл. 4, полученная оценка времени RC соответствует экспериментальным зарядным характеристикам СК.

Разрядные характеристики СК представлены на рис. 4 а и б соответственно при вариации параметров R и C. Как видим, время разряда определяется как токовой нагрузкой, так и величиной емкости C. Для повышения эффективности применения СК в ЭМ следует рекомендовать разработчикам СК обратить внимание на повышение их рабочего напряжения  $U_p$ , так как при малых  $U_p$  СК соединяются последовательно с неизбежным снижением суммарной емкости.

### Исследование динамики совместного применения АКБ и СК

С помощью разработанного стенда и результатов исследования параметров АКБ и СК исследована эффективность их применения на этапе разгона. Показано, что при увеличении относительной энергии, запасенной СК, относительно энергии АКБ от 10 % до 24 %, относительное время пробег  $\Delta t_{пр}/t_{пр}$  возрастает от 10 % до 20 %, что показано на рис. 5.

Эффективность использования СК совместно с АКБ с целью сглаживания пиковых нагрузок при движении в черте города существенно зависит от соотношения энергий АКБ и СК. В частности, если, энергия запасенная, СК менее 15-25 % по отношению к АКБ, практически невозможно реализовать преимущества их совместного использования.

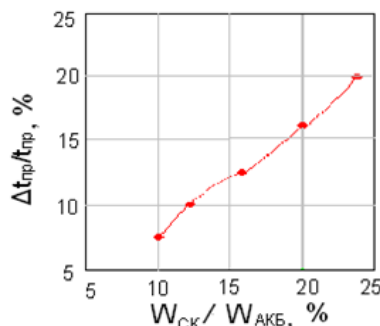


Рис. 5. Результаты исследований увеличения пробега электромобиля при подключении СК

### Проектирование и разработка микроконтроллерной системы управления режимами работы АКБ и СК

Для оптимального и оперативного перераспределения энергоснабжения ЭД между АКБ и суперконденсаторами в пределах одного цикла движения электромобиля в городе авторами предложено техническое решение системы электропитания электромобиля (Патент Украины на полезную модель № 61461 «Электрическая тяговая система электромобиля»), структурная схема которой с расшифровкой основных элементов представлена на рис.6.

Как следует из структурной схемы на рис. 6, предложенное микроконтроллерное (МК) устройство управления представляет систему автоматического регулирования выходного напряжения с применением цепи обратной связи. Это существенно отличает предложенную систему от аналогичных существующих, которые используют более дорогие универсальные цифровые процессоры и реализуют режим коммутации СК и АКБ по принципу жесткой логики.

Предложенная МК система управления обеспечивает высокую чувствительность системы автоматического регулирования выходного напряжения на нагрузке благодаря малой погрешности АЦП (не более 2%) и высокому быстродействию при переключениях. Применяемая элементная база (МК и ключевые транзисторы) обладает быстрым действием в режимах переключения порядка 40 мкс и возможностью работы в жаркую летнюю погоду (до +60°C) и зимних

условиях (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ), что гарантирует достаточно высокую эксплуатационную надежность. Кроме этого предложенная микроконтроллерная система является относительно дешевой по сравнению с цифровыми сигнальными процессорами, применяемыми в ЭМ.

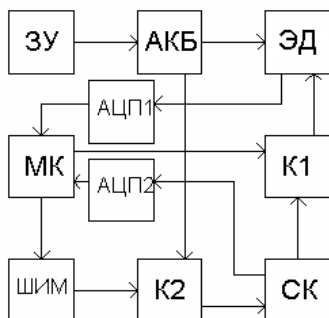


Рис. 6. Структурная схема системы микроконтроллерного управления энергопитанием электромобиля: ЗУ – Зарядное устройство; АКБ – Аккумуляторная батарея; ЭД – Электродвигатель; МК – Микроконтроллер; АЦП1 – Аналогово-цифровой преобразователь; АЦП2 – Аналогово-цифровой преобразователь; К1 – Ключ; ШИМ – Широтно-импульсный модулятор; К2 – Ключ; СК – Суперконденсатор

Отмеченные преимущества предложенной микроконтроллерной системы управления будут более существенными с учетом перспективы использования новых поколений микроконтроллеров и ключевых быстродействующих транзисторных элементов.

## Выводы

1. Показано, что пиковая мощность электромобиля на этапе разгона при прочих равных параметрах обратно пропорциональна времени разгона и прямо пропорциональна его массе.
2. Режим разряда АКБ практически определяет запас хода электромобиля, зависит от типа аккумулятора и токовой нагрузки (мощности электродвигателя). Установлено, что с увеличением токовой нагрузки в 3 раза (с 1,4 А до 4,2 А) существенно сокращается продолжительность разрядного цикла АКБ и соответственно уменьшается время пробега.
3. Установлено, что время заряда СК возрастает пропорционально величине емкости, а продолжительность цикла разряда зависит как от величины емкости, так и токовой нагрузки.
4. Показано, что применение СК сглаживает ток АКБ в системе тягового электропривода, что увеличивает время межзарядного пробега. Установлено, что если энергоемкость СК менее 15-25 % по отношению к АКБ, практически невозможно реализовать преимущества их совместного использования. При увеличении относительной энергии запасенной СК к энергии АКБ от 10 % до 24 % относительное время пробега возрастает от 10 % до 20 %.
5. Предложена МК система управления режимами работы АКБ и СК в тяговой системе электромобиля, обеспечивающая оптимальное и оперативное управление энергопитанием ЭД.

## Литература

1. Energy efficient vehicles technology [Текст] : proceedings of the 2nd EEVC, June 18-19, 2012 Dresden / editors : B. Baker, L. Morawietz . – Expert verlag: 2012. – 201 p.
2. Guzzella, L. Vehicle propulsion systems. Introduction to modelling and optimization [Текст] / Lino Guzzella, Antonio Sciarretta. – Springer-Verlag.-Berlin: 2005. - 291 p.
3. Advanced batteries, accumulators and fuel cells [Текст] : proceedings of the 11th ABAF Meeting / Brno university of technology. - Brno: 2010. – 187 p.
4. Power Electronics in Electric (Hybrid Electric Vehicle Applications) [Текст] : proceedings of the IEEE vehicle power and propulsion conference, September 7-11, 2009 Dearborn / editor : Chris Mi. – University of Michigan : 2009. - 231 p.
5. Ефремов, И. С. Теория и расчет тягового привода электромобиля [Текст] / И. С. Ефремов, А. П. Пролыгин, Ю. М. Андреев, А. Б. Миндлин. - М.: Высшая школа, 1984. - 344 с.
6. Аносов, В. Н. Анализ изменения разрядной емкости тяговой аккумуляторной батареи [Текст] / В. Н. Аносов, В. М. Кавешников, А. В. Орёл // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 6. – С. 33 – 36.
7. Burke, A. Ultracapacitors: why, how and where is the technology [Текст] / A. Burke // Journal of power sources. – № 91. – 2000. – P. 37 – 50.