

УДК 629.113.6

Авторами розроблена тягова система електро-мобіля (ЕМ) з мікроконтролерним керуванням електроживленням, яка має зворотній зв'язок по споживаному струму електродвигуна та контролю ступеня зарядженості суперконденсаторів (СК). Для оцінки ефективності розроблено стенд тягової системи ЕМ. В роботі викладені результати досліджень режиму розгону при використанні комбінованого джерела електроживлення, який складається із СК та акумуляторної батареї

Ключові слова: енергія, електромобіль, тягова система, накопичувач енергії, суперконденсатор, акумуляторна батарея

Авторами разработана тяговая система электро-мобили (ЭМ) с микроконтроллерным управлением электропитанием, основанная на обратной связи по потребляемому току электродвигателя и контролю степени заряженности суперконденсаторов (СК). Для оценки эффективности разработан стенд тяговой системы ЭМ. В работе изложены результаты исследований режима разгона при использовании комбинированного источника электропитания, состоящего из СК и аккумуляторной батареи

Ключевые слова: энергия, електромобиль, тяговая система, накопитель энергии, суперконденсатор, акумуляторная батарея

РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЯГОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОМОБИЛЯ С СУПЕРКОНДЕН- САТОРАМИ

Н. И. Слипенко

Доктор физико-математических наук,
профессор*

E-mail: nslip@kture.kharkov.ua

М. Ю. Гуртовой

Аспирант*

E-mail: misha.gurtovoy@ukr.net

*Кафедра микроэлектроники, электронных
приборов и устройств
Харьковский национальный
университет радиоэлектроники
пр. Ленина, 14, г. Харьков, Украина, 61166

1. Введение

Приоритетным направлением развития экологически чистого транспорта являются гибридные автомобили с комбинированной энергоустановкой и электромобили. Это объясняется тем, что по своим экологическим характеристикам электрический транспорт значительно превосходит различные виды транспортных средств с двигателями внутреннего сгорания.

Исследование характеристик аккумуляторных батарей (АКБ), как базового элемента тяговой системы электромобили (ЭМ), показало, что АКБ характеризуются большой энергоемкостью, которую можно дискретно наращивать, и ограничением по максимальному пиковому току. Это очень важно на этапе пуска, ускорения, а также в стандартном цикле движения [1, 2].

В настоящее время во многих работах отмечаются положительные качества суперконденсаторов (СК), которые могут эффективно применяться для сглаживания пиковых токов, возникающих в системах энергопитания. Существенное внимание уделяется применению СК в системах с электрохимическими источниками питания (в частности с АКБ), используемыми в качестве основных в автономных транспортных средствах.

2. Литературный обзор

Существует ряд работ [3 – 5] по применению СК в гибридных ЭМ в сочетании с ДВС, топливными

элементами и АКБ. Среди них следует отметить результаты применения СК для электропитания стартера ДВС в городских автобусах. В этом случае СК применяется для предотвращения ухудшения рабочих характеристик АКБ благодаря снижению пиковой нагрузки в момент старта. Итак, существует ряд работ, которые содержат примеры применения СК систем в гибридных ЭМ в качестве вспомогательных источников питания и различных типов АКБ как основных источников питания. В то же время неясными остаются такие важные аспекты, как элементы коммутации на полупроводниковых приборах, критерии выбора различных режимов работы и управление степенью заряженности СК.

Проанализируем результаты разработок мощных энергоемких СК (тысячи фарад на элемент) с выходом на коммерческий продукт, которые достигнуты компаниями Maxwell (США), Nesscap (Канада), Matsuchita Electric Ind. (Япония), EPCOS (Германия, подготовка производства по лицензии компании Maxwell) - конденсаторы с неводным электролитом, ЭСМА, ELIT, ECOND (Россия) - конденсаторы с водным электролитом [6 – 8]. Серийные и опытные образцы конденсаторов с двойным электрическим слоем различных фирм способны практически полностью перекрыть диапазон по удельной энергии и удельной мощности между АКБ и электролитическими конденсаторами, а в некоторых случаях даже конкурировать с ними в приграничных областях [9]. В табл. 1 приведены характеристики СК некоторых фирм-производителей, а внешний вид показан на рис. 1.

Таблица 1

Характеристики СК

Суперконденсатор	Емкость, А·ч	Вес, кг	Удельная энергия, Вт·ч/кг	Рабочее напряжение, В
SKT 47 Ф	0,038	0,005	10	2,5
Panasonic 1200 Ф	1,0	0,34	4,2	
Ness 2600 Ф	2,2	0,65	5,1	
Maxwell 2700 Ф	2,25	0,7	4,8	
Samwha 25 Ф	-	0,007	3,78	2,7
Samwha 200 Ф	-	0,034	4,54	



а

б

Рис. 1. Суперконденсаторы компаний Ness и Panasonic: а – СК компании Ness; б – СК компании Panasonic

Сравнительная оценка удельных параметров современных АКБ и СК (табл. 2) позволяет утверждать, что:

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

2) Суперконденсаторы способны выделять в импульсе большую пиковую мощность (до 100 кВт), но имеют относительно малый запас энергии.

Современные технологии позволяют изготавливать литий-ионные АКБ с более высокими значениями удельной энергии (к примеру, ячейки с микропористыми электродами) по сравнению с СК, что оказывает некоторое противодействие внедрению последних. В то же время передовые разработки новых СК (например, гибридные СК) приближают скорое производство и поставку конечному потребителю накопителей энергии нового поколения. Например, корпорация Panasonic удалось сделать рывок в производстве СК марки “Goldcap” почти за 30 лет пребывания на рынке электроники (рис. 2), что указано в работе [4].

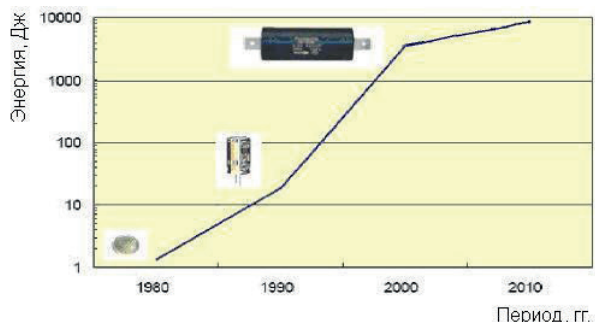


Рис. 2. Зависимость энергии суперконденсаторов «Goldcap» от периода разработки

Таблица 2

Сравнительная оценка параметров АКБ и СК

Тип накопителя	Основные параметры			
	Удельная энергия, кВт·ч/кг	Удельная мощность, кВт/кг	Срок службы, циклы / время экспл., годы	Время зарядки, ч., мин.
АКБ	> 100	< 1	200 - 1000/3 - 5	7 - 10 ч.
Литий-ионные	100 - 150	0,3	500 - 1000	-
Никель-кадмиевые	45 - 65	0,15 - 0,5	500 - 800	-
Свинцово-кислотные	30 - 60	0,25 - 0,4	200-500	-
СК	< 0,01	< 4	> 100,000 / 5-15	несколько мин.

3. Постановка проблемы

На современном этапе развития транспортных систем с использованием возобновляемых источников энергии существует проблема обеспечения пиковой мощности на стадии разгона. Одним из решений является применение суперконденсаторов (СК), которые обладают преимуществом по сравнению с АКБ при обеспечении больших всплесков потребляемой мощности благодаря их высокой удельной мощности и возможности быстрой зарядки. Следовательно, добавление СК в состав тяговой системы ЭМ будет разгружать АКБ во время запуска электродвигателя (ЭД) и движения под уклон.

4. Разработка стенда

4.1 Цель работы

Целью работы является разработка и исследование комбинированной системы энергопитания ЭМ, основанной на совместном использовании АКБ и СК с микроконтроллерным управлением режимов ее работы. Выполненный краткий обзор состояния разработок ЭМ позволяет сформулировать следующие основные задачи исследований:

- анализ состояния разработок электромобилей, АКБ и СК;
- исследование возможности управления накопленной энергией СК;
- оценка времени разгона ЭМ при постоянном разряде СК различной емкости;
- проектирование и разработка микроконтроллерной системы управления режимами работы АКБ и СК;
- исследование эффективности совместного применения АКБ и СК.

4.2 Структурная схема стенда для исследования применения СК на этапе пуска ЭМ

Авторами разработан стенд для исследования применения СК на этапе пуска ЭМ. Структурная схема

стенда и общий вид показаны на рис. 3, 4. Стенд состоит из электродвигателя, АКБ, СК и микроконтроллерного модуля управления. Конструкция выполнена как макет ЭМ с прямой передачей: в процессе разгона пиковая мощность превышает стационарную в два раза.

Для достижения оптимальной производительности таких гибридных систем хранения энергии следует обратить внимание на некоторые важные моменты. Параллельное подключение СК и АКБ действительно уменьшает переходные токи, но наиболее приемлемый способ применения СК основан на возможности управления накопленной энергией. Именно для достижения этой цели был разработан микроконтроллерный модуль управления.

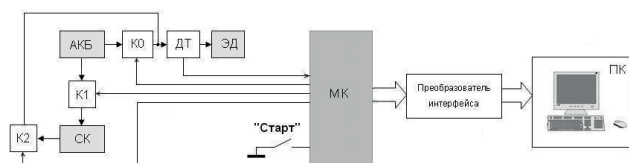


Рис. 3. Структурная схема стенда: МК – микроконтроллер; ПК – персональный компьютер; СК – суперконденсатор; АКБ – аккумуляторная батарея; К0, К1, К2 – электронные ключи; ДТ – датчик тока; ЭД – электродвигатель

На практике программа микроконтроллерного модуля управления («МК» на рис. 3) реализована в виде трёх подсистем с целью независимости их разработки и функционирования (рис. 5).

Система измерений (СИ) предназначена для постоянного сбора и обновления информации о состоянии основных узлов стенда (тока ЭД, напряжения на СК и АКБ, текущего состояния органов управления).

Система переключений (СП) выполняет роль исполнительного механизма для начального включения и переключений режимов питания электродвигателя (ЭД), а также обеспечивает подзарядку СК от АКБ с использованием ШИМ и ключа К1 в случае необходимости. Её работа заключается в ожидании команд от системы управления и выполнении этих команд.

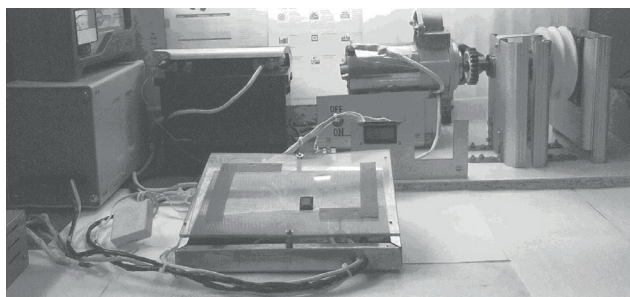


Рис. 4. Общий вид стенда

Система управления (СУ) является главной системой и обеспечивает общее управление лабораторным стендом тяговой системой ЭМ. В общих чертах, алгоритм её работы заключается в постоянном опросе данных от системы измерений (СИ) и, в зависимости от характера их изменений, выдаче команд системе переключений (СП).

Разработанный стенд работает в широком диапазоне нагрузки по току. Поэтому стенд может быть полезен

для имитации различных режимов работы системы «ЭД-нагрузка», а именно:

- Исследование влияния нагрузки ЭД на режим энергопотребления при постоянной и переменной скорости вращения вала.
- Определения влияния на время разгона при разных скоростях вращения ЭД: нагрузки, энергоёмкости СК и АКБ.
- Раздельное во времени или параллельное подключение АКБ и СК к ЭД.
- Возможность вариации скорости вращения вала ЭД программно-аппаратным путем.

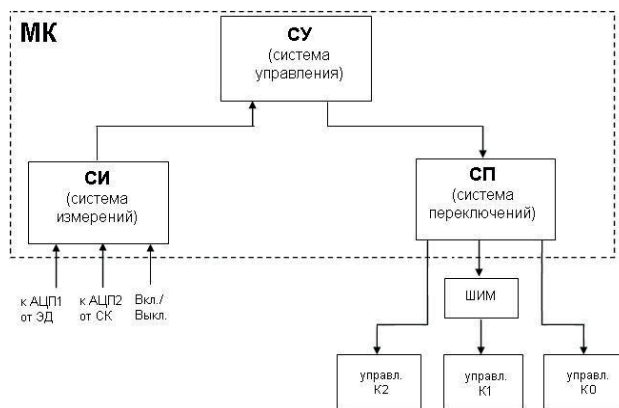


Рис. 5. Структурная схема микроконтроллерного модуля управления

Кроме того возможно применение модулей СК с рабочим напряжением до 15 В с любой полезной конфигурацией, а также использование АКБ с различной ёмкостью (в Ампер-часах).

Основные данные (ток ЭД, напряжения на СК и АКБ) постоянно поступают в персональный компьютер («ПК» на рис. 3) для последующей обработки, анализа и визуализации результатов в программе MS Excel. На основе полученных данных возможен поиск компромиссных (оптимальных) параметров СК и АКБ для достижения требуемых массо-габаритных характеристик комбинированного источника питания. Так, на рис. 6 представлено окно программы MS Excel, в котором показаны временные диаграммы работы стенда при питании от свинцово-кислотной АКБ Ford 12 В 43 А·ч (зависимость тока ЭД и напряжения АКБ от времени).

В качестве датчика тока применен датчик на основе эффекта Холла Allegro ACS758LCB-100B-PFF-T с чувствительностью 20 мВ/А.

4. 3 Основные экспериментальные данные

Далее с помощью разработанного стенда была исследована эффективность пуска ЭД с помощью СК различной ёмкости. На рис. 7 а, б приведены временные диаграммы напряжений и токов разряда СК в качестве источника электропитания ЭД. Заштрихованные кривые отражают разряд модулей СК, при котором не происходит эффективная отдача пиковой мощности, что эквивалентно торможению.

Как следует из рис. 6, источник электропитания на основе СК обеспечивает определенную пиковую мощность. В то же время двойное увеличение ёмко-

сти СК не дает адекватного увеличения тока разряда. Характер полученных зависимостей (рис. 6, 7) вызван затратами мощности на преодоление сил инерции и аэродинамического сопротивления, действующих на систему «ЭД-нагрузка».

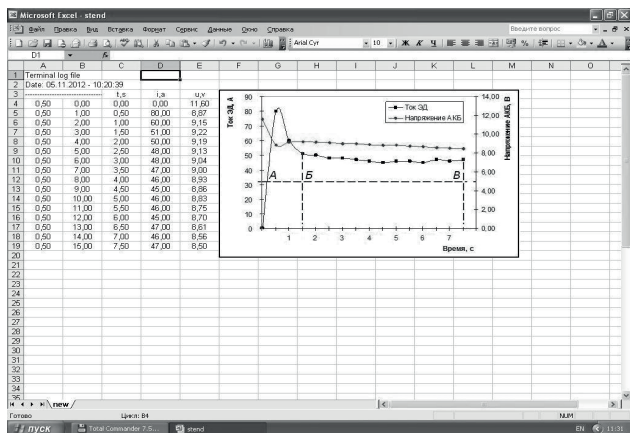
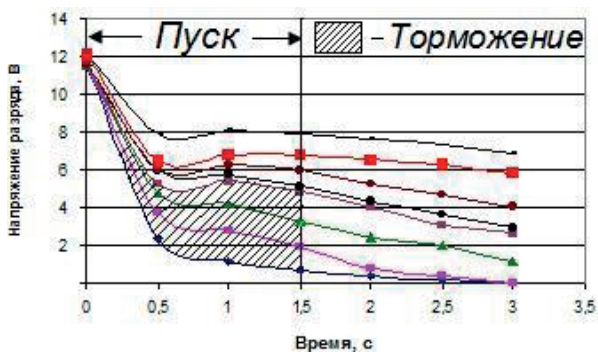
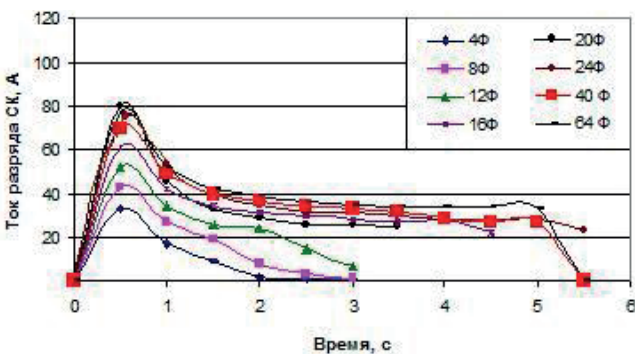


Рис. 6. Окно программы MS Excel и временные диаграммы работы стенда



а



б

Рис. 7. Временные диаграммы разряда различных СК:
а — зависимость напряжения разряда от времени;
б — зависимость тока разряда от времени

Расчет, выполненный по экспериментальным данным (рис. 6), показал, что энергия $W_{АКБ}$ для пуска составляет 1926 Вт·с (0,5 Вт·ч на отрезке *АВ*), а стационарная мощность равна 960 Вт·с.

На рис. 8 показано, что модуль СК общей емкостью 24 Ф самостоятельно способен обеспечивать энергией стадию пуска на 90 %. Таким образом, лабораторный стенд показывает одно из решений проблемы обеспечения пиковой мощности.

Авторами считается перспективным разделение разряда СК и АКБ во времени. Этот режим был исследован согласно схеме, приведенной на рис. 3. На первом этапе произведен пуск от СК (например, отрезок *АВ* на рис. 6), а затем подключение АКБ к ЭД (например, отрезок *БВ* на рис. 6) с последующим прекращением разряда СК. В этом случае стенд работает следующим образом. При нажатии на кнопку «Старт» происходит подключение СК в цепь электропитания ЭД путем включения силового PROFET транзистора К2. Эта функция стенда выполняется при условии заряда СК до требуемой величины напряжения (обычно 12,3 В). По окончании разряда СК до нижнего предела напряжения происходит отключение СК и включение ключа К0. Теперь ЭД запитан от АКБ. После этого СК подзарядывается от АКБ через ключ К1 импульсами ШИМ. На практике эта функция реализована в виде зарядного устройства на основе понижающего DC-DC преобразователя согласно работе [10].

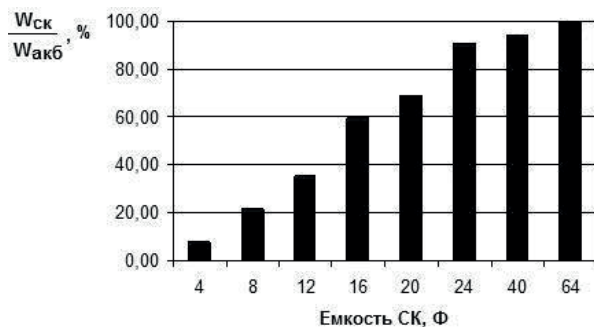


Рис. 8. График зависимости отношения $W_{СК} / W_{АКБ}$ от емкости СК

Временные диаграммы напряжения АКБ и тока показаны на рис. 9. Из рис. 9 следует, что СК запускает ЭД, тем самым не допуская резкого падения напряжения на АКБ и её разряда кратковременным пиковым током. Также СК берет на себя часть нагрузки, ограничивая максимальный ток разряда и продлевая тем самым срок службы АКБ. Результатом работы алгоритма микроконтроллерного модуля управления является сохранение энергии АКБ (0,5 Вт·ч).

Запасенная энергия СК емкостью 40 Ф и массой 0,2 кг составляет в данном случае 0,15 % от всей энергии АКБ. В данном стенде для пуска используется треть энергии, накопленной СК. Отсутствие пикового тока АКБ благодаря СК делает последний важным вспомогательным элементом новых систем электропитания ЭМ. Как известно, относительно большая доля энергии (от 16 % до 48 %) затрачивается на разгон ЭМ. Применяя СК, возможно потратить часть энергии АКБ на движение, тем самым увеличив время межзарядного пробега и продлив срок службы АКБ.

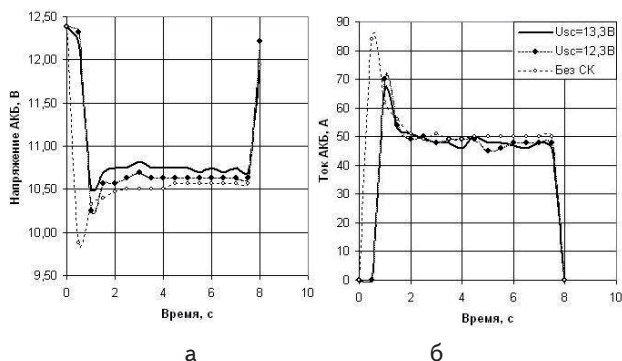


Рис. 9. Временные диаграммы работы стенда в режиме управления накопленной энергией СК: а – зависимость напряжения АКБ от времени; б – зависимость тока АКБ от времени

5. Апробация результатов исследований

Полученные в результате исследования графики и временные диаграммы позволяют оценить практическую значимость разработанного стенда, которая определяется возможностью отработки и моделирования режимов работы тяговых систем ЭМ.

6. Выводы

1. Установлено, что источник электропитания на основе СК обеспечивает требуемую пиковую мощность в системе энергообеспечения ЭМ. В то же время, двойное увеличение емкости СК не дает адекватного увеличения тока разряда. Таким образом, определена эффективность пуска ЭД с помощью различных СК. Показано, что СК с малой удельной энергоемкостью способен функционировать в тяговой системе ЭМ с малым временем разгона.

2. Предложена МК система управления режимами работы АКБ и СК в тяговой системе ЭМ, обеспечивающая оптимальное и оперативное управление энергопитанием ЭД. Благодаря разработанному стенду представляется реальным увеличение времени межзарядного пробега. Также одним из путей увеличения времени межзарядного пробега является использование повышающего стабилизатора, который позволяет увеличить высвобождаемую суперконденсатором энергию на 30 % и позволит применять более дешёвый суперконденсатор с меньшей ёмкостью. Перспективным направлением исследований является вариация скорости вращения вала ЭД и последующий анализ работы комбинированного источника электропитания.

3. Отмеченные свойства предложенной тяговой системы ЭМ будут более существенными с учетом перспективы использования новых АКБ (например, LiFePO_4) и более энергоёмких СК (например, СК на

основе передовых суперионных проводников или ионных жидкостей).

Литература

1. Investigation into the traction system of battery-driven vehicle (electric motorcar) with super capacitors [Text] : Proceedings of the 2nd EEVC, June 18-19, 2012 Dresden / editors : B. Baker, L. Morawietz. – Dresden : Expert verlag, 2012. – 201 p.
2. Шурыгина, В. Суперконденсаторы: размеры меньше, мощность выше [Текст] / В. Шурыгина // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - 2009. - №7 – С. 10 - 20.
3. Shuai, L. A new battery/ultracapacitor energy storage system design and its motor drive integration for hybrid electric vehicles [Text] / L. Shuai, K. A. Corzine, M. Ferdowsi // IEEE transactions on vehicular technology. – 2007. – Т. 56, №4. – P.1516-1523.
4. Batteries and ultracapacitors for electric hybrid and fuel cell vehicles [Electronic resource] / Batteries and ultracapacitors for electric hybrid and fuel cell vehicles. – Available at: \www/ URL: http://lifepo4.info/Battery_study/Batteries/Batteries_and_Ultracapacitors_for_Electric_Hybrid_and_Fuel_Cell_Vehicles.pdf/ (accessed 24 September 2013)
5. Ultracapacitors in electric drives [Electronic resource] / Maxwell ultracapacitors in electric drives. - Available at: \www/ URL: http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/200904_whitepaper_electricdrives.pdf/ (accessed 25 September 2013)
6. Балыкшов, А. Ионисторы [Текст] / А. Балыкшов // Электронные компоненты – Украина. - 2005. - №11. – С. 91-97.
7. Инновации в сфере электрохимических конденсаторов [Электронный ресурс] / ЗАО «Элтон». - Режим доступа: \www/ URL: http://community.sk.ru/press/events/april2012/popechitelsky_sovet/p/elton.aspx/ - 24.09.2013 г. – Загл. с экрана.
8. A brief history of supercapacitors [Electronic resource] / A brief history of supercapacitors by J.Miller. – Available at: \www/ URL: <http://cantecsystems.com/ccrdocs/brief-history-of-supercapacitors.pdf/> (accessed 25 September 2013)
9. Кузнецов, В. Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство [Текст] / В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов, И. Востриков // Компоненты и технологии. – 2005. – № 6. – С. 29 – 34.
10. Saudi, A. Development of a current control ultracapacitor charger based on digital signal processing [Text] / Ahmad Saudi Samosir // Telkomnika. – 2009. – Vol. 7, № 3. – P. 145-150.