

## **Проблемы эксплуатации суперконденсаторов.**

Шаркович Р. П.

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси  
Минск, Республика Беларусь, rsharcovich@yahoo.com

Ключевые слова: БАЛАНСИРОВКА, ИОНИСТОР, НАКОПИТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, СИСТЕМА КОНТРОЛЯ, СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ, МОНИТОРИНГ, СУПЕРКОНДЕНСАТОР.

### **Введение**

Применение суперконденсаторов с каждым годом становится все более распространенным, в связи с чем к ним предъявляются новые требования по увеличению времени питания электрооборудования. Суперконденсаторы – новые типы энергоемких конденсаторов, емкость и мощность которых в несколько раз превышает обычных конденсаторов. В статье рассматриваются основные проблемы и особенности эксплуатации суперконденсаторов в составе электрооборудования различной техники. При создании ионисторов высокой емкости путем соединения нескольких элементов в последовательные и параллельные цепи возникает ряд трудностей, связанных с разбросом параметров отдельных элементов. Максимальный срок эксплуатации суперконденсаторов определяется параметрами, влияющими на ее энергетические характеристики и срок службы.

Существуют различные варианты построения ионисторов, каждый из которых обладает определенными достоинствами и недостатками. В статье приведены примеры пяти систем выравнивания напряжения на отдельных ячейках суперконденсаторов; определены критерии выбора тока для пассивного способа балансировки с помощью шунтирующих резисторов, а также приведена схема его улучшенного варианта; рассмотрены основные достоинства и недостатки активных методов балансировки; обоснована целесообразность применения активной и пассивной балансировки во время разряда ионистора. Сравнительный анализ методов выравнивания напряжения на ячейках выявляет проблемы конденсаторного способа балансировки, решение которых позволит оптимизировать его для различной электрической техники.

В настоящее время ионисторы находят широкое применение в повседневной жизни людей в качестве источников питания микросхем памяти, электрохимических источников тока, сглаживающих фильтров и т.д.

Применение ионисторов:

1. Аккумуляторные батареи – авиация, автотранспорт, тяговый и общественный транспорт, в том числе и рельсовый.
2. В качестве устройств резервного питания – телевизоры, СВЧ-печи.
3. Резервное питание запоминающего устройства во время смены батареи – видеокамеры, платы памяти.
4. Питание микросхем памяти установок тюнера – музыкальные центры.
5. Резервное питание микросхем памяти для хранения номеров абонентов – телефоны.
6. Охранная сигнализация
7. Электронная измерительная техника: электросчетчики, электронные измерительные приборы.

### **История появления суперконденсаторов**

Первый конденсатор с двойным слоем на пористых угольных электродах был запатентован в 1957 году фирмой General Electric. Так как точный механизм к тому моменту времени не был ясен, было предположено, что энергия запасается в порах на электродах, что и приводит к образованию «исключительно высокой способности накопления заряда». Чуть позже, в 1966, фирма Standard Oil of Ohio, Cleveland (SOHIO), USA запатентовала элемент, который сохранял энергию в двойном слое.

Столкнувшись с фактом небольшого объёма продаж, в 1971 году SOHIO передала лицензию фирме NEC, которой удалось удачно продвинуть продукт на рынке под именем «Supercapacitor» (Суперконденсатор). В 1978 году фирма Panasonic выпустила на рынок «Gold capacitor» («Gold Cap») «Золотой конденсатор», работающий на том же принципе. Эти конденсаторы имели относительно высокое внутреннее сопротивление, ограничивающее отдачу энергии, так что эти конденсаторы применялись только как накопительные батареи для SRAM.

Ионисторы в СССР были анонсированы в журнале «Радио» № 5 в 1978 году. Это были ионисторы КИ1-1 и они имели ёмкость от 0,1 до 50 Ф в зависимости от типоразмера.

Первые ионисторы с малым внутренним сопротивлением для применения в мощных схемах были разработаны фирмой PRI в 1982 году. На рынке эти ионисторы появились под именем «PRI Ultracapacitor».

### Типы суперконденсаторов

Существующие типы суперконденсаторов, несмотря на большое их разнообразие, подразделяют на три типа:

1. Ионисторы с идеально поляризуемыми углеродными электродами («идеальные» ионисторы). Как электрохимические системы их можно записать, например, следующим образом:

- $C / 30\% \text{ водный раствор } KOH / C +$ ;
- $C / 38\% \text{ водный раствор } H_2SO_4 / C +$ ;
- $C / \text{Органический электролит} / C +$ .

В этом типе ионисторов на электродах в рабочем интервале напряжений не протекают электрохимические реакции, накладывающие известные ограничения на скорость зарядки и разрядки, поэтому по величине энергии и мощности, температурному диапазону и количеству циклов они ближе остальных типов к области 2 оксидно-электролитических конденсаторов. Ёмкость ионисторов типа 1 представляет собой ёмкость двух последовательно включённых через эквивалентное последовательное сопротивление ( $R_{э\text{кв}}$ ) ионисторов  $C_K$  и  $C_A$ .

2. Ионисторы с идеально поляризуемым углеродным электродом и неполяризуемыми или слабо поляризуемыми катодом или анодом («гибридные» ионисторы).

Как электрохимические системы их можно записать, например, следующим образом:

- $Ag / \text{Твёрдый электролит } RbAg_4I_5 / C +$ ;
- $C / 30\% \text{ водный раствор } KOH / NiOOH +$

В этом типе ионисторов на одном из электродов (катоде или аноде) протекает электрохимическая реакция (как в аккумуляторах), поэтому их называют гибридными суперконденсаторами (гибрид конденсатора и аккумулятора). В конденсаторе с твёрдым электролитом  $RbAg_4I_5$  реакция протекает на катоде:  $Ag^{++} + e^- \rightarrow Ag^0$ , а в конденсаторе с 30% водным раствором KOH реакция протекает на аноде:  $Ni^{+2} - e^- \rightarrow Ni^{+3}$ .

Ёмкость ионисторов типа 2 в два раза выше, чем ионисторов типа 1, так как ёмкость неполяризуемого электрода замкнута сопротивлением протекающей электрохимической реакции. Эта реакция накладывает диффузионные и кинетические

ограничения на скорость зарядки и разрядки ионисторов типа 2, поэтому по величине удельной энергии и мощности, температурному диапазону и количеству циклов ионисторы типа 2 ближе ионисторов типа 1 к области аккумуляторов.

3. Псевдоконденсаторы — это ионисторы, на поверхности электродов которых при заряде и разряде протекают обратимые электрохимические процессы (хемосорбция или интеркаляция ионов, содержащихся в электролите). Как электрохимические системы их можно записать, например, следующим образом:

- $Ni(H) / 30\% \text{ водный раствор } KOH / NiOOH +$ ;
- $C(H) / 38\% \text{ водный раствор } H_2SO_4 / PbSO_4(PbO_2) +$ .

По принципу накопления энергии псевдоконденсаторы можно отнести как к ионисторам (если энергия накапливается только в поверхностном слое электродов), так и к аккумуляторам (если энергия накапливается не только в поверхностном слое, но и в объеме электродов).

Удельная энергия псевдоконденсаторов благодаря протеканию электрохимических реакций на обоих электродах сравнима с энергией, накапливаемой в аккумуляторах, однако величина удельной мощности и количество циклов в режиме «зарядка-разрядка» могут быть на порядок выше того, что достигнуто в области аккумуляторов, так как диффузионные и кинетические ограничения удается минимизировать за счет увеличения площади поверхности электродов. По величине удельной энергии и мощности, температурному диапазону эксплуатации и количеству циклов псевдоконденсаторы ближе всех остальных типов конденсаторов к аккумуляторам.

Деление ионисторов на три типа позволяет ориентироваться в большом многообразии этих изделий как по типу используемых электрохимических систем, так и по эксплуатационным характеристикам.

### Сравнительные характеристики аккумуляторов, ионисторов и конденсаторов

Сравнительные характеристики накопителей электрической энергии в наглядном виде принято рассматривать в координатах «удельная энергия  $E$  (кДж/кг или Вт·час/кг; при этом  $3,6 \text{ кДж/кг} = 1 \text{ Вт·час/кг}$ ) — удельная мощность  $P$  (кВт/кг)». На рисунке изображены такие характеристики и области перспективного развития некоторых типов аккумуляторов, ионисторов и конденсаторов с оксидными диэлектриками в логарифмическом масштабе. Сравнительные характеристики электрохимических накопителей электрической энергии. (Рисунок. 1)

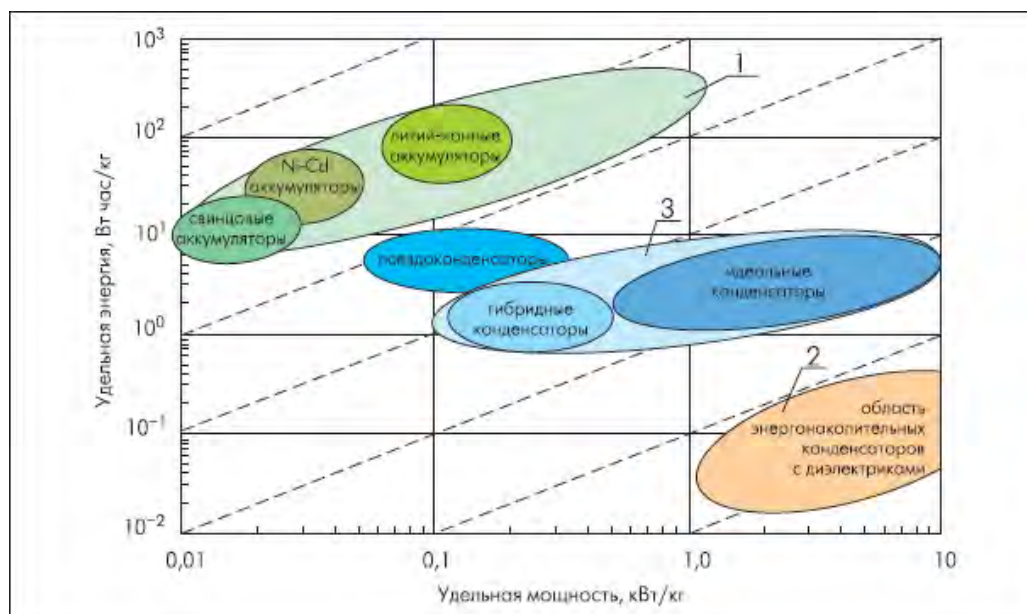


Рисунок. 1.

1 — область перспективного развития перезаряжаемых химических источников тока (аккумуляторов); 2 — область перспективного развития энергонакопительных конденсаторов с диэлектриками; 3 — область перспективного развития конденсаторов с двойным электрическим слоем.

Аккумуляторы на этом рисунке занимают верхний левый угол и охватывают область 1 по величине удельной энергии порядка  $10^1$ – $10^2$  Вт·час/кг и по величине удельной мощности порядка  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  кВт/кг; оксидно-электролитические конденсаторы занимают нижний правый угол и охватывают область 2 по величине удельной энергии порядка  $10^{-2}$ – $10^{-1}$  Вт·час/кг и по величине удельной мощности порядка  $10^1$ – $10^2$  кВт/кг, а характеристики ионисторов (область 3) расположены между ними.

По количеству циклов «зарядка-разрядка» (порядка  $10^4$ – $10^6$ ), а также по величине диапазона рабочих температур (от  $-50$  до  $+85$  °С) ионисторы также занимают промежуточное положение между аккумуляторами и оксидно-электролитическими конденсаторами.

Существенный недостаток ионисторов и аккумуляторов — низкое рабочее напряжение. Для увеличения рабочих напряжений или емкости ионисторы, так же, как и аккумуляторы, соединяются последовательно или параллельно в пакеты (батареи, модули).

### **Способы решения проблем эксплуатации суперконденсаторов**

Поскольку последовательно-соединенные ионисторы имеют разброс параметров (хоть и не значительный), то с течением времени несоответствие параметров увеличивается. Стандартные зарядные устройства контролируют только общее напряжение на всей цепочке аккумуляторов и обеспечивают необходимый ток заряда. Расхождение таких параметров накопителей как емкость, внутреннее сопротивление, ток утечки является причиной отличия необходимого времени для заряда накопленной энергии в отдельных накопителях. Например, ячейка с меньшей емкостью заряжается быстрее ячейки с большей емкостью при протекании через них одинакового тока. После достижения 100 % емкости необходимо или прекратить заряд, или заряжать суперконденсатор током, равным значению тока утечки, а продолжение заряда приведет к увеличению напряжения на отдельной ячейке выше оптимального и вызовет ускоренную деградацию элемента. В частности, ионисторы могут безопасно работать только при нормальном напряжении заряда. При превышении значения напряжения заряда 2,8В в элементе начинают происходить необратимые последствия, которые приводят к повышенному нагреву элемента и скорому выходу его из строя. Заметим, что рост температуры на каждые  $10$  °С относительно номинальной температуры снижает срок службы ионистора в 2-3 раза.

Учитывая все перечисленные выше особенности, сохранение и обеспечение максимального срока службы накопителя возможно только при постоянном мониторинге и контроле состояния ее отдельных ячеек. В частности, для решения проблемы с неравномерным зарядом ячеек необходимо применять системы выравнивания (балансировки), которые поддерживают оптимальное значение напряжения и емкости отдельных элементов электрохимических источников тока. Такие системы могут быть как автономными, так и управляемыми. Наиболее важным из них является способ, на котором основано выравнивание. Сложно определить однозначно лучший способ балансировки, поскольку каждый из них обладает рядом достоинств и недостатков. Знание принципов работы, положенных в основу методов балансировки, поможет создать более эффективные системы электропитания транспортных средств.

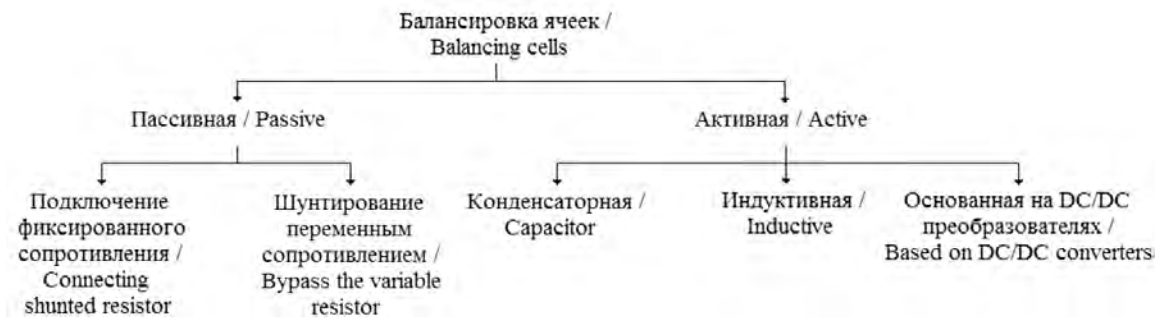


Рисунок. 2. – Способы балансировки электрохимических накопителей электрической энергии.

При разработке методов и устройств используются общеинженерные подходы. На основе анализа и изучения принципов работы систем выравнивания рассмотрены схемотехнические решения, основанные как на одном способе выравнивания заряда, так и на комбинации таких способов.

Схема системы выравнивания заряда с помощью подключения резистора с фиксированным сопротивлением показана на рис. 1.

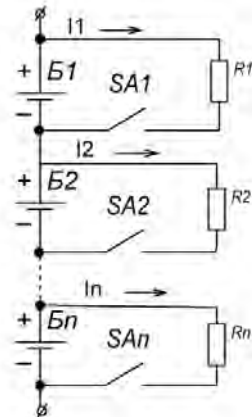


Рисунок. 3. – Система балансировки заряда накопителей с помощью резистора.

Суть данного метода заключается в шунтировании резистором аккумуляторной ячейки, которая уже зарядилась до 100 %, но при этом не завершился заряд всего накопителя. Резисторы  $R1-R3$  при соответствующих ключах ограничивают ток через ячейки и тем самым препятствуют перезаряду ионистора. Главным достоинством рассматриваемого метода является простота. В данном случае балансировку целесообразно проводить только в режимах заряда, поскольку подключение дополнительного сопротивления к ячейке АБ во время разряда приведет к неэффективному использованию энергии аккумулятора. Выделяется 3 критерия определения тока, протекающего через шунтирующий резистор: величина дисбаланса ячейки, емкость элемента и время, за которое необходимо провести балансировку. Для накопителей, которые часто проходят циклы заряда-разряда, оптимальной является балансировка ячеек от 10 до 20 % от мощности за 1 зарядно-разрядный период.

Разновидностью способа, представленного на рисунке. 4, является вариант шунтирования ячейки, достигшей максимального заряда, резистором не с фиксированным, а с изменяемым сопротивлением [12]. Этого можно добиться, поменяв в схеме рисунок. 3. резисторы  $R1-R3$  на MOSFET-транзисторы и контролируя их сопротивление с помощью управляющего сигнала (рисунок. 4).



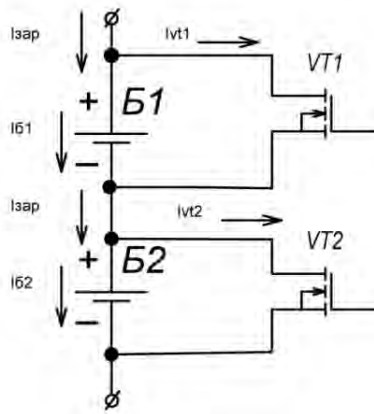


Рисунок. 4. – Разновидность способа пассивной балансировки накопителей

Суть активной балансировки заключается в обеспечении требуемого напряжения на ячейках ионистора за счет перераспределения энергии от ячеек с высоким уровнем заряда к ячейкам с его более низким уровнем. Один из самых простых способов активной балансировки показан на рис. 5.

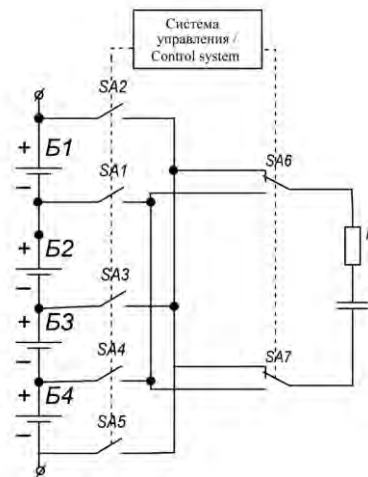


Рисунок. 5. - Топология балансировки с одним переключающимся конденсатором

Для осуществления выравнивания заряда между ячейками цепочка  $RC$  последовательно подключается ко всем ячейкам (Рисунок. 5). Максимальное напряжение на обкладках конденсатора соответствует напряжению наиболее заряженной ячейки, и при следующем подключении цепочки  $RC$  к другому накопителю будет передаваться дополнительный заряд от конденсатора. Резистор  $R$  используется для ограничения тока через конденсатор. Недостатком данного метода является длительное время выравнивания напряжения между ячейками. Возможно также построить систему управления и переключать цепочку  $RC$  только между ячейками с наибольшим и наименьшим напряжениям, и таким образом в некоторых случаях уменьшить время выравнивания, но это потребует дополнительного использования измерительных цепей для каждой ячейки.

Топология выравнивания, показанная на рисунке. 6, требует  $(n - 1)$  конденсаторов и  $n$  переключателей для балансировки  $n$  ячеек. Данный метод прост в управлении, поскольку ключи  $SA$  имеют только 3 состояния: когда все переключатели приведены в верхнее положение; когда все переключатели не подключены ни к одной цепи; когда все переключатели переведены в нижнее положение накопителя. Система выравнивания, изображенная на рис. 6, производит балансировку быстрее, чем представленная на рис. 5.

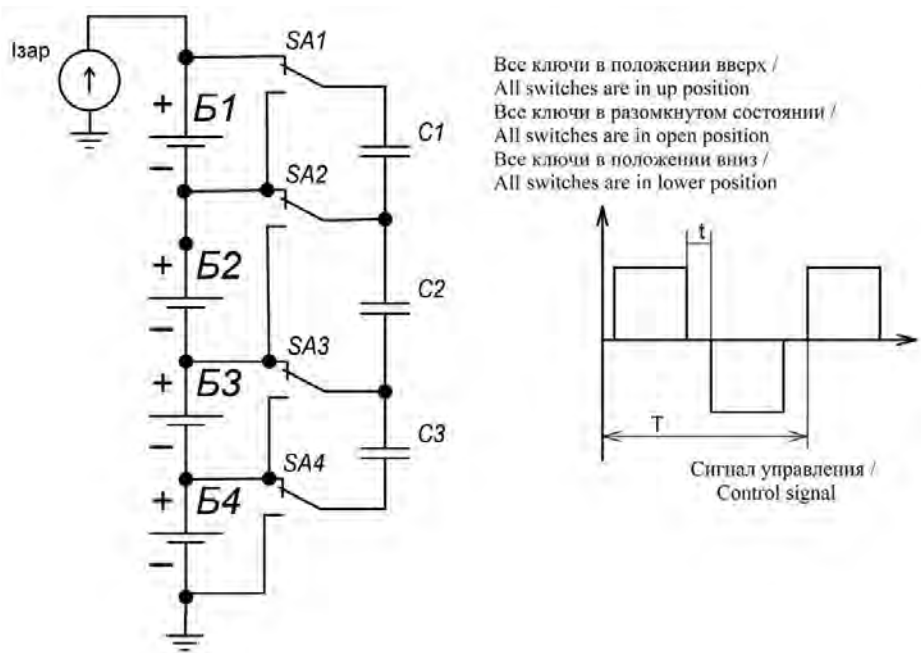


Рисунок. 6. – Система активной балансировки накопителей.

Еще одним способом выравнивания напряжения в ячейках суперконденсаторов является использование индуктивностей (рисунок. 7). Рассматриваемая система балансировки при отличии напряжений соседних ячеек накопителя производит перераспределение энергии между ними. При подаче ШИМ-сигнала на транзистор VT1 происходит накопление энергии в индуктивности L1 и разряд ячейки S1, после чего энергия от L1 передается в S2 за счет подачи ШИМ-сигнала на VT2. С помощью VT3, VT4 и L2 балансировка производится между S2 и S3.

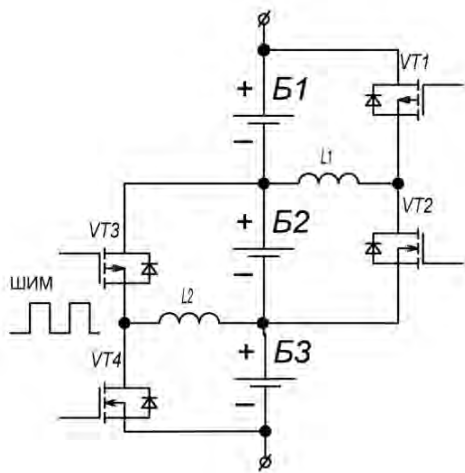


Рисунок. 7. - Схема балансировки батареи индуктивностью

Недостатком метода является то, что передача энергии из первой ячейки к последней занимает долгое время, а кроме этого, необходимо принимать дополнительные меры по ограничению тока через индуктивности, используя при этом дополнительные обвязывающие цепи и сложную систему управления.

### Заключение

Применение любой системы балансировки накопителей для производства позволит существенно повысить срок службы суперконденсаторов. Однако пассивная балансировка является менее выгодной из-за неэффективного использования энергии при разряде

накопителя и потери большого количества энергии в виде тепла при ее заряде. Балансировка батареи индуктивностью, в свою очередь, сложна в реализации и требует существенных затрат на использование индуктивностей и других магнитных компонентов высокого номинала и сложной системы управления, что приводит к увеличению удельной стоимости. Наиболее оптимальным, с точки зрения сохранения энергии и оптимальной стоимости, являются методы, основанные на перераспределении энергии между ячейками посредством конденсаторов. Для улучшения коэффициента полезного действия в конденсаторных системах балансировки необходимо исключить ограничивающие резисторы и решить проблему возникновения импульсных токов.

### **Список использованных источников**

1. **Уэн С.**, Выравнивание заряда батарей обеспечивает долгое время работы и продлевает срок службы. / Уэн С. – США: Техас Инструментс, 2010. – 14 с.
2. **Морозько О.А.**, Оптимизация параметров гибридных электромобилей. /О.А. Морозько, Ю.Н Петренко. – Минск: БНТУ, Кафедра «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов», 2014. – 2 с.
3. **Морозько О.А.**, Matlab simulation and user satisfaction assessment of phev. /О.А. Морозько, Ю.Н Петренко – Минск: БНТУ, 2015. – 6с
4. **Иншаков А.П.**, Проблема мониторинга и балансировки аккумуляторных батарей транспортных средств. / А.П.Иншаков, Ю.Б. Федотов, С.С. Десяев, Д.В. Байков. – Россия, Саранск: ФГБОУ ВПО «МГУ им. Н. П. Огарёва», 2016. – 9 с.
5. **Рыкованов А. С.**, Активные и пассивные системы баланса Li-ion аккумуляторных батарей. / А.С. Рыкованов, С.А. Беляев, - Россия: Силовая электроника, Статья, 2009. – 4 с.
6. **Аносов В. Н.**, Методы и средства повышения эффективности систем тягового электропривода автономных транспортных средств. / Аносов В. Н., - Новосибирск: Автореферат диссертации., 2008. – 2с.
7. **Варламов Д.О.**, Моделирование устройства балансировки Li – Ion батареи с коммутируемыми конденсаторами для электромобиля. / Варламов Д. О., - Россия, Москва: МГТУ МАМИ, 2008. – 7с.
8. **Шаркович Р.П.**, Анализ векторного управления синхронных двигателей с постоянными магнитами. / Шаркович Р.П., - Минск: ОИМ НАН Беларуси, 2015 - 8с.
9. **Кузнецов В.**, Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы): разработка и производство. /В. Кузнецов, О. Панькина, Н. Мачковская, Е. Шувалов, И. Востриков. – Санкт-Петербург: ОАО НИИ«Гринкорд», 2005. – 5 с.