

## **Емкостные накопители энергии в системе электростартерного пуска автомобильных двигателей**

к.т.н. Коротков В.И., к.т.н. Малеев Р.А., Мычка Н.В., Гулин А.Н.  
Университет машиностроения (МАМИ)  
8 (495) 223-05-23, доб. 1574

*Аннотация.* В работе предлагается использовать сравнительную оценку систем электростартерного пуска с емкостным накопителем энергии аккумуляторной батареи.

*Ключевые слова:* система электростартерного пуска, емкостной накопитель энергии, аккумуляторная батарея.

Пуск двигателей автотранспортных средств существенно затрудняется с понижением температуры, что в значительной степени связано с увеличением вязкости электролита в свинцово-кислотной аккумуляторной батарее (АБ). Поэтому в последние годы повышенное внимание уделяется применению нетрадиционных источников энергии для запуска двигателя, в качестве которых могут применяться емкостные накопители энергии, молекулярные накопители энергии, ионисторы. Такие источники обладают практически нулевым внутренним сопротивлением и способны быстро накапливать и отдавать запасенную энергию, значительно снижая токовую нагрузку с аккумуляторной батареи в момент пусковых режимов, улучшая тем самым ее характеристики [1].

Емкостные накопители энергии (НЭ) в настоящее время обладают высокой удельной мощностью и КПД, способны выдерживать большое число циклов заряда-разряда. На московском предприятии МНПО «ЭКОНД» разработана и выпускается новая система пуска двигателей, в которой используются импульсные конденсаторы сверхвысокой энергоемкости (ИКЭ). Разработанная система пуска может использоваться как для карбюраторных двигателей, так и для дизелей самого широкого диапазона мощности от 10 до 3000 л.с.

Главное преимущество таких суперконденсаторов, которые выпускаются под маркой ИКЭ «Супер-Эконд», состоит в уникальной способности накапливать электрический заряд сверхвысокой плотности – в 10 раз больший, чем в различных традиционных конденсаторах и обеспечивать мощность импульсного разряда до 10 раз выше мощности самых лучших аккумуляторов.

Принцип действия ИКЭ «Супер-Эконд» основан на прямом накоплении заряда в двойном электрическом слое на поверхности контакта высокопористого углеродного электрода со связанным химически инертным электролитом. Таким образом, накопление заряда осуществляется фактически на молекулярном уровне.

Такие конденсаторы по своим электрическим параметрам значительно превосходят обычные. Кроме сверхвысокой плотности накапливаемой энергии и удельной мощности импульсного разряда их отличает очень малое внутреннее сопротивление, возможность длительного хранения заряда (до нескольких сотен часов), устойчивость к токам короткого замыкания и практически неограниченное число циклов перезарядки.

ИКЭ «Супер-Эконд» представляет собой батарею конденсаторных элементов, заключенных в герметичный корпус. Их отличает высокая механическая прочность, пожаро- и взрывобезопасность, широкий диапазон рабочих температур, длительный срок службы (более 12 лет), эксплуатационная и экологическая безопасность.

Автомобильное электрооборудование включает в себя систему электроснабжения, систему пуска двигателя внутреннего сгорания с системой зажигания смеси и систему сервисного обеспечения. При этом системам пуска и, соответственно, электроснабжения приходится работать в двух принципиально различных режимах: длительном номинальном режиме при работающем двигателе внутреннего сгорания и пусковом режиме - режиме пуска (а в ряде случаев и разгона автомобиля).

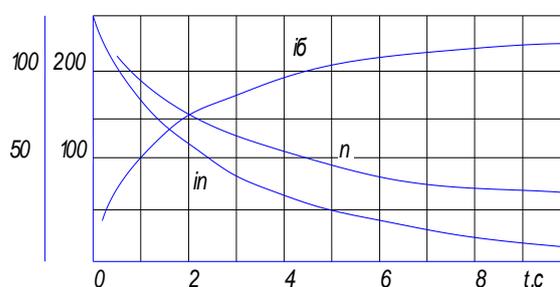
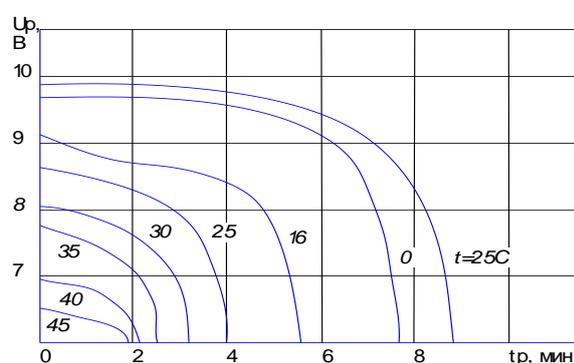
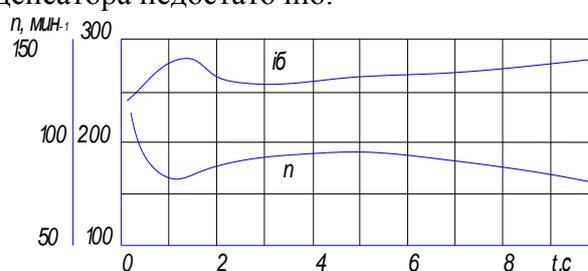
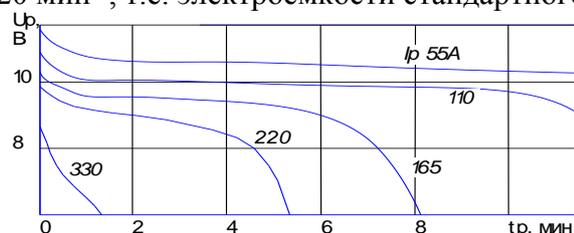
Пиковый режим работы (это в основном пуск двигателя) требует больших затрат энергии, а энергию двигатель получает только от источника запасенной энергии, аккумуляторной

батареи. Необходимость обеспечения пикового режима определяет поиск накопительных источников энергии, работающих самостоятельно на пиковую нагрузку или совместно с аккумуляторной батареей. Такой накопитель должен за относительно длительное время собрать излишки энергии, вырабатываемой двигателем (или сконцентрировать энергию слаботоchnого источника), а затем отдать ее при необходимости за короткое время пикового режима [3].

Недостаточность обеспечения пикового режима энергией аккумуляторной батареи обычно усугубляется плохой отдачей ею электрической энергии при низких температурах и ее обычном частичном разряде. На рисунке 1 приведены разрядные токовые характеристики (т.е. зависимости напряжения разряда  $U_p$ , от постоянной разряда  $\tau_p$ ) аккумуляторных батарей, используемых в российских легковых (типа БСТ-55ЭМ) и в грузовых автомобилях (типа БСТ-190ТР). Величина отдаваемой энергии на рисунке равна площади ограниченной соответствующей кривой, энергоотдача при низких температурах ( $-30^\circ\text{C}$ ) снижается в сравнении с "летними" условиями более чем в три раза. Условия пуска ухудшаются при загустевшем масле, холодном двигателе, низкой температуре рабочей смеси и т.д.

В качестве накопителя энергии целесообразно использовать электрический конденсатор. В сравнении с другими типами накопителей (индуктивные, химические и другие) конденсаторный имеет наиболее оптимальные параметры по количеству энергии в единице объема и времени рабочего цикла. Этот тип накопителя может обеспечить самую большую удельную мощность – до  $106 \text{ Вт/см}^3$  (для сравнения – удельная мощность аккумуляторной батареи составляет  $0,26...0,45 \text{ Вт/см}^3$ ). Однако реально необходимая энергоотдача за время пуска ( $\sim 10 \text{ с}$ ) автомобильного двигателя может быть обеспечена конденсаторным накопителем только при условии, что его электрическая емкость составит десятки или даже сотни фарад.

При номинальных напряжениях, используемых в автомобиле (6, 12 или 24 В), запас энергии составит до 10 Дж. Для сравнения укажем, что для прокручивания коленчатого вала холодного двигателя (при температуре  $-20^\circ\text{C}$ ) автомобиля ВАЗ-21083 необходима энергия 3000 Дж при частоте вращения коленчатого вала  $40 \text{ мин}^{-1}$  и 4200 Дж при частоте вращения  $120 \text{ мин}^{-1}$ , т.е. электроемкости стандартного конденсатора недостаточно.



**Рисунок 1. Разрядные характеристики аккумуляторных батарей**

**Рисунок 2. Пусковые характеристики двигателя**

Основой конденсаторного накопителя энергии должна быть батарея ячеек, построенных на использовании эффекта двойного электрического слоя. Поверхностный слой - граница двух фаз (твердое-твердое, твердое-жидкое и т.п.) обладает избытком поверхностной энергии.

Такая поверхность за счет ионного обмена с электролитом, имеющим свободные ионы,

приобретает заряд с появлением заряда другого знака в веществе, образовавшем поверхность. Заряды, собранные на поверхности, и ионы, их компенсирующие, образуют обкладки "конденсатора" с расстоянием между ними, соответствующим межатомным (молекулярным) радиусам, т.е. около  $10^{-8}$  см.

Площадь контакта с электролитом из-за специальной обработки твердого тела (придание определенной шероховатости – активация) может быть сделана очень большой ( $10^2 \dots 10^3$  м<sup>2</sup>/г). Тогда электрическая емкость такого конденсатора при малых внешних размерах и массе может составлять десятки Фарад на 1 г вещества, участвующего в ионном обмене.

На рисунке 2 приведены пусковые кривые изменения силы тока стартера и частота прокручивания двигателя автомобиля ВАЗ-21073 при температуре  $-25^\circ\text{C}$ . Подключение только аккумуляторной батареи 6СТ55 обеспечивает вращение коленчатого вала двигателя в течение 10с с частотой вращения  $75 \dots 100$  мин<sup>-1</sup> (рисунок 2а).

При параллельном подключении аккумуляторной батареи 6СТ32 (75% заряда) и накопителя емкостью 50 Ф начальная частота прокрутки коленчатого вала двигателя составила 120 мин<sup>-1</sup> (рисунок 2б), тогда как одна батарея обеспечивала прокручивание коленчатого вала двигателя с частотой только 40 мин<sup>-1</sup> [4].

В настоящее время ведутся разработки накопителей с использованием жидкого или твердого электролита. Эксплуатационные параметры опытных разработок в значительной степени зависят от вещества поляризуемого электрода и электролита. Технологические разработки с применением жидкостного электролита проще, так как доступна широкая вариация состава и концентрации жидкостных растворов.

Однако механизмы ионного обмена (ионного тока накопителя, подвижность ионов) в жидком и твердом телах принципиально различны, но именно они определяют такой важный параметр накопителя как внутреннее сопротивление  $R_{\text{н}}$ . Эта величина должна быть не только сопоставима с сопротивлением аккумуляторной батареи, но и обеспечить необходимые временные характеристики электрических цепей заряда-разряда – RC.

Особенностью жидкостного электролита является высокая подвижность ионов и, следовательно, большая электропроводимость ( $10^2 \dots 10^3$  Ом). Для твердого вещества характерна жесткая привязка местоположения ионов в кристаллической решетке, проводимость большинства ионных соединений мала ( $10^{-8} \dots 10^{-7}$  Ом). Для определенных классов веществ, начиная с некоторой температуры, их электропроводимость скачком увеличивается от  $1 \dots 10^{-3}$  Ом и становится сравнимой с проводимостью жидких электролитов, расплавов солей (таблица 1). Эта особенность материала электролита приводит к малому внутреннему сопротивлению ячейки накопителя, фактически совпадающему с сопротивлением электролита аккумуляторной батареи (1,5 Ом) и, следовательно, обеспечивает малые потери электрической энергии при больших значениях силы рабочих токов [2].

Таблица 1

**Параметры некоторых ячеек на твердых электролитах**

Система ячеек	Напряжение, В	Сопротивление, Ом
Ag-AgBr-CuBr	0.7	$4 \cdot 10^7$
Ni-Cr-SnSO <sub>4</sub> -PbO <sub>2</sub>	1.5	$2 \cdot 10^6$
Ag-AgI-V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.4	$4 \cdot 10^4$
Ag-AgBr-Te-CuBr <sub>2</sub>	0.8	-
Ag-AgCl-I-KJCl	1.0	$5 \cdot 10^4$
Ag-Ag <sub>3</sub> SJ-J <sub>2</sub>	0.7	4
Ag-RbAg <sub>4</sub> J <sub>5</sub> -C	0.6	2

Новые разработки в настоящее время в большей степени относятся к накопителям с использованием твердого электролита – ионитов. В отличие от жидкостных накопителей (кислотных или щелочных), у ионитов сила токов саморазряда меньше, и они дольше сохраняются в заряженном состоянии. Твердые электролиты должны иметь высокую ионную проводимость при низких температурах, обеспечивая эффективную работу накопителя в зимнее время. Прогресс в разработке таких накопителей связан в первую очередь с разработкой дешевой технологии приготовления стабильных материалов, обладающих такой проводимостью.

На сегодня высокая ионная проводимость обнаружена у двух классов веществ – ионных кристаллов и соединений с большой концентрацией примесных ионов на основе твердых растворов окислов и глиноземов.

Механизм проводимости ионных кристаллов определяется строением кристаллической решетки. В результате анионы (отрицательно заряженные частицы), имеющие большой радиус, располагаются упорядоченно, образуя периодическую структуру, в которой образуются пустоты различного типа, занимаемые катионами (положительно заряженными частицами). Число занятых пустот определяется числом катионов в молекуле соединения и симметрией расположения молекул в кристалле.

Последовательность заполнения пустот того или иного типа определяется величиной необходимой для этого энергии. Количество указанных пустот может быть больше, чем число катионов, а различие в энергии между разными типами пустот может быть незначительным.

Для кристаллов с сильной ионной связью переход (перескок) катиона между позициями затруднен и возможен только по локальным неоднородностям кристаллической решетки, возникшим, например, из-за механических напряжений, внедрения атомов примеси и т.п.

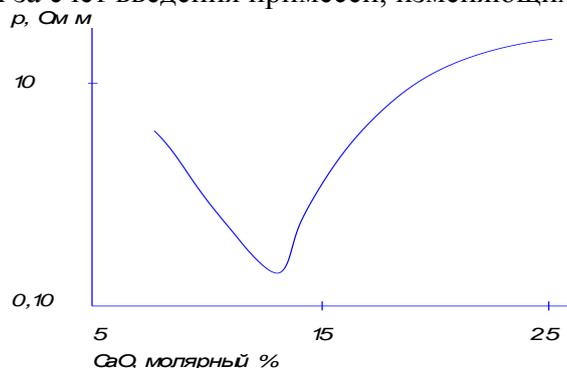
Но при температуре выше так называемой температуры суперионного перехода тепловая энергия иона становится соизмеримой с энергией, необходимой для перехода из одной пустоты в другую. В этом случае малое внешнее электрическое поле может перевести катион в другую энергетическую эквивалентную (или почти эквивалентную) соседнюю позицию решетки, т.е. создать электрический ток.

Таким образом, возникает состояние разупорядочения расположения катионов и подвижность ионов возрастает на несколько порядков. Вещество в таком состоянии можно использовать как твердый электролит в накопительной ячейке, необходимым условием будет требование, чтобы температура суперионного перехода была достаточно низкой.

Например, структура ионного проводника  $\text{AgI}$  является жесткой анионной матрицей, содержащей подвижные катионы, распределенные по разрешенным позициям ячейки (пустотам). Под действием внешнего электрического поля катионы будут относительно легко перемещаться по пустотам матрицы.

Для второй группы твердых электролитов характерна мелкодисперсная, пористая субструктура, т.е. большая контактная поверхность, образованная твердыми растворами соответствующих оксидов.

Кроме оксидов возможно использование глиноземов, для которых характерна миграция катионов натрия  $\text{Na}$  между блоками оксида алюминия. На рисунке 3 представлено изменение удельного сопротивления электролита системы  $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$ . Экспериментальные точки получены при одинаковой температуре. Представленная зависимость иллюстрирует возможность изменения сопротивления за счет введения примесей, изменяющих подвижность ионов.



**Рисунок 3. Изменение удельного сопротивления твердого электролита системы  $\text{ZrO}_2\text{-CaO}$**

Для этой группы твердых электролитов характерно появление скачков поверхностного электрического потенциала. В таких слоях будут иметь место смещение химического равновесия и аномально высокая поверхностная подвижность ионов.

"Конденсатор" на основе двойного электрического слоя не может быть использован при достаточно больших напряжениях. Предельное напряжение определяется электрическим потенциалом материала. Это означает, что уже небольшое внешнее электрическое поле приводит к упорядоченной ионной конфигурации в двойном электрическом слое. Причем в самом слое создается большая разность потенциалов (локально до  $10^5 \dots 10^6$  В/см). Фактически каждый электролит имеет свою предельно допустимую разность потенциалов на внешних обкладках накопительной ячейки, предельное значение этой разности составляет 1В (таблица 1). При конструировании накопителя, рассчитанного на рабочие напряжения выше предельных для слоя, необходимо предусмотреть определенное электрическое соединение ячеек накопителей.

Другой особенностью ячейки двойного электрического слоя является целесообразность задания полярности обкладок ячеек. Это обусловлено подбором оптимальной пары материалов, участвующих в ионном обмене – сочетание компонентов должно учитывать знаки и соотношение ионных радиусов, подвижность ионов и химическую активность.

Эксплуатационные параметры накопителя можно проиллюстрировать на примере ячейки, построенной на основе электролита  $RbAg_4J_4$ . Ячейка объемом  $5,5 \text{ см}^3$  имеет массу 23 г и электрическую емкость 5 Ф. Твердый электролит устойчив до напряжения 0,66 В, что определяет рабочее напряжение ячейки в 0,5 В. Интервал рабочих температур – от  $-65 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $+140 \text{ }^\circ\text{C}$ . Для реального накопителя (на напряжение 5 В) необходимо десять ячеек, что увеличивает внутреннее сопротивление и уменьшает силу токов в электрической цепи. Созданием изделия со стабильными эксплуатационными параметрами разработка ионисторов на сегодняшний день не завершена. Фактически имеются опытные экземпляры индивидуального исполнения. Рассматривая рекламные материалы разработчиков, базирующихся на аккумуляторных заводах, мы видим, что основные работы идут в направлении создания накопителей с жидкостными электролитами. Сведения об ионисторах противоречивы, а параметры реальных сборок (площадь электродов, электрическая емкость, изменение общей массы, соотношение времен заряда-разряда и др.) существенно отличаются друг от друга. Реально приводимые данные по накопителям электрической энергии, предлагаемым на потребительском рынке, свидетельствуют о необходимости серьезных исследований, в том числе по поиску новых дешевых материалов компонент электродов с относительно доступной технологией.

### Выводы

1. Несмотря на указанные трудности в исследовании твердых накопителей, они имеют преимущества по сравнению с накопителями на жидкостных электролитах. Предварительный физико-химический анализ позволяет надеяться, что у твердых накопителей должны быть выше удельные энергии (электроемкости), меньше сила тока утечки, внутреннее сопротивление, характеристики стабильны в более широком интервале температур, наконец, они не нуждаются в герметизации.
2. Технология сборки твердых ячеек сложнее и требует специального оборудования, что и объясняет существенно меньшее количество рекламных материалов по твердым образцам по сравнению с изделиями на жидких электролитах.

### Литература

1. Чижков Ю.П., Антипенко В.С., Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Применение емкостных накопителей энергии в комбинированных источниках тока для электропусковых систем. – Москва – Сочи, Материалы международной конференции «Системные проблемы надежности, математического моделирования и информационных технологий», т.1, 1997.
2. Антипенко В.С., Нигматуллин Ш.М. Активные центры адсорбции угольных волокон накопителя энергии на жидких электролитах. – М., Материалы международной конференции. Системные концепции в науке, технике и экологии, 2006.
3. Малеев Р.А., Шматков Ю.М. Исследование нетрадиционных источников тока в системах электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания. – М., «Известия МГТУ

«МАМИ». Научный рецензируемый журнал, № 1(19), 2014, т. 1.

4. Лебедев С.А., Гаврицкий Д.А., Антипенко В.С. Пусковое устройство с молекулярным накопителем энергии. – М., «Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал, № 2(24), 2015, т. 1.

### **Конструирование и расчет двухпоточных гидромеханических передач**

д.т.н. проф. Котиев Г.О.<sup>1</sup>, д.т.н. проф. Шарипов В.М.<sup>2</sup>,  
к.т.н. проф. Щетинин Ю.С.<sup>2</sup>, к.т.н. Вязников М.В.<sup>3</sup>, Гаев С.В.<sup>3</sup>, Розеноер М.Г.<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, <sup>2</sup>Университет машиностроения, <sup>3</sup>ООО «МИКОНТ»,  
(495) 223-05-23, доб. 1111, trak@mami.ru

*Аннотация.* Приведена методика конструирования и расчета двухпоточных гидромеханических передач, широко используемых в трансмиссиях современных колесных и гусеничных машин. Рассмотрено согласование нагрузочной характеристики двухпоточной гидромеханической передачи с внешней скоростной характеристикой двигателя. Показаны преимущества двухпоточных гидромеханических передач по сравнению с однопоточными.

*Ключевые слова:* двухпоточная гидромеханическая передача, двигатель, внешняя и нагрузочная характеристики двухпоточной гидромеханической передачи, согласование двухпоточной гидромеханической передачи с характеристикой двигателя.

Диапазон силового регулирования гидродинамических передач не превышает 2,5...3,5 и не обеспечивает полностью требования, предъявляемые колесными и гусеничными машинами (автомобилями, тракторами и быстроходными гусеничными машинами) [1-6]. Для увеличения силового диапазона регулирования сочетают гидродинамические и механические передачи, соединяя их между собой последовательно или параллельно. Такие передачи получили название гидромеханических передач (ГМП).

Для ГМП с последовательным соединением агрегатов (однопоточных) КПД, кинематическое и силовое передаточные числа равны произведению КПД и передаточных чисел соответствующих механизмов. Эти передачи имеют большой диапазон регулирования, но низкий КПД.

Более высоким КПД обладают двухпоточные (дифференциальные) ГМП, в которых мощность передается двумя потоками через механические и гидравлические звенья. Такая передача обычно состоит из гидротрансформатора и дифференциального звена, выполненного в виде трехзвенного дифференциального механизма (ТДМ) со смешанным или внешним зацеплением шестерен. При этом через гидротрансформатор передается только часть мощности, остальная же мощность передается через механическую передачу, имеющую значительно более высокий КПД по сравнению с гидротрансформатором.

В зависимости от расположения дифференциального звена по отношению к гидротрансформатору различают двухпоточные ГМП с дифференциальным звеном на входе или на выходе.

Основными показателями двухпоточных ГМП являются кинематическое  $u_{ГМП}$  и силовое  $\hat{i}_{ГМП}$  передаточные числа и КПД  $\eta_{ГМП}$ .

Для пояснения работы такой передачи рассмотрим наиболее распространенную схему двухпоточной ГМП с дифференциальным звеном на выходе (рисунок 1).

В данной передаче мощность с ведущего на ведомый вал передается двумя потоками.

Первый поток мощности передается чисто механическим путем через солнечную шестерню на сателлиты и далее на водило, связанное с ведомым валом передачи. Здесь существуют только механические потери потока мощности. КПД передачи в данном потоке мощности высокий.

Второй поток мощности передается через гидротрансформатор на эпициклическую ше-