

СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

В. А. Войтенко¹, К. И. Семенов², М. В. Матковский¹¹Одесский национальный политехнический университет²Одесский национальный университет имени И.И. Мечникова

Аннотация. Рассматриваются известные системы накопления энергии, применяемые на электротранспорте, их удельные технические параметры, ресурс, экономические и экологические аспекты. Проводится сравнительный анализ их конструкционных особенностей и технических параметров. Анализируются возможности применения различных типов накопителей на транспортных средствах, делаются выводы о тенденциях развития накопителей энергии, формулируются рекомендации по области применения накопителей для некоторых конкретных видов транспорта.

Ключевые слова: транспортные средства, электрический транспорт, энергия, мощность, накопители энергии, энергоёмкость; маховик, аккумуляторы, ионисторы, удельные параметры.

Введение

В современных условиях все более острое значение приобретают проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов, повышения надежности и экологической эффективности средств транспортирования пассажиров и грузов [1]. Это обусловлено постоянным ростом цен на энергоносители, а также моральным старением техники. Разработка новых видов транспорта, как правило, связана со значительными материальными затратами, поэтому особое значение приобретает совершенствование и модернизация существующих видов транспорта. Одной из основных целей модернизации существующих электрических транспортных средств (ТС) является повышение их энергетической эффективности. Одним из способов достижения этой цели является применение комбинированных силовых установок, в состав которых входят накопители различных видов энергии.

Проблемы аккумуляирования энергии при использовании автономных источников энергии рассматривались и ранее, однако до недавнего времени практическое решение этого вопроса было сопряжено с рядом технических трудностей, которые состояли в отсутствии технологий и материалов, необходимых для создания высокоэффективных накопителей энергии (НЭ) повышенной энергоёмкости, которые бы обладали достаточно высокой мощностью и надежностью. Поэтому применение подобных систем часто оказывалось экономически нецелесообразным из-за их высокой стоимости и низкой надёжности. В результате, затраты на изготовление и эксплуатацию этих систем перекрывали ожидае-

мую экономию топлива от их использования. Сегодня последние достижения науки и техники позволяют по-новому взглянуть на проблему экономии топливно-энергетических ресурсов. Среди научных работ, проводимых в данной области, следует отметить исследования ряда авто-ров, посвященных применению ёмкостных электрических, электрохимических, пневматических, инерционных и других типов НЭ [2-6, 10-20].

1. Цель работы.

Обзор основных видов НЭ, которые могут быть использованы на ТС, анализ их основных технических характеристик, выявление тенденций их развития, выработка рекомендаций по их рациональному применению при разработке накопительных систем, которые могут быть использованы в источниках электрической энергии, применяемых на транспорте.

2. Материалы исследования.

В общем случае функциональная схема системы накопления энергии состоит из НЭ (маховик, конденсатор, аккумулятор и т.д.) и устройств передачи энергии (механических, электрических или электромеханических), которые осуществляют взаимную связь НЭ с системами ТС (рис. 1).

НЭ может располагаться на борту ТС или вне его. Примером использования НЭ, расположенного на борту ТС, является схема гибридного силового агрегата с электромеханическим приводом и с маховиковым НЭ фирмы "BMW", которая показана на рис 2 [21]. В этой схеме используются: 1 – источник электрической энергии; 2 – блок управления электрической машиной; 3 – электрическая машина; 4 – дифференци-

© Войтенко В. А., Семенов К. И.,
Матковский М. В., 2019

альный механизм; 5 – мультипликатор; 6 – маховик-накопитель; 7 – главная передача.

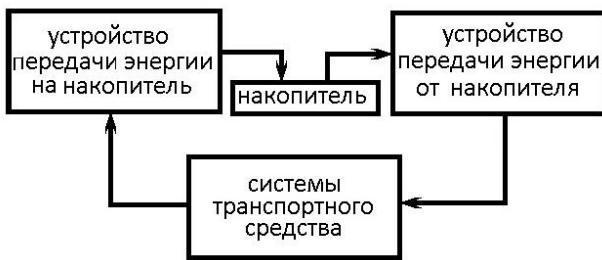


Рис. 1. Функциональная схема системы накопления энергии в электротранспорте.

При разгоне ТС энергия поступает от источника электрической энергии 1 через блок управления 2 на электрическую машину 3, которая в этом случае работает в двигательном режиме. Механическая энергия с вала электрической машины 3 через дифференциальный механизм 4 и через главную передачу 7 поступает на ведущие колёса ТС. При торможении ТС энергия поступает от ведущих колёс через главную передачу 7 и через мультипликатор 5 на маховик 6. В результате скорость ТС уменьшается, а скорость маховика 6 увеличивается. При повторном разгоне механическая энергия, накопленная в маховике, поступает через мультипликатор 5 и через главную передачу 7 на ведущие колёса, уменьшая количество энергии, потребляемой от электрической машины 3 и от источника электрической энергии 1.

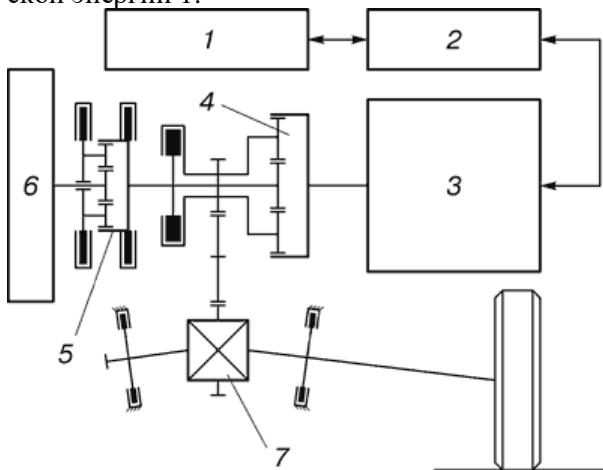


Рис. 2. Схема гибридного силового агрегата с электромеханическим приводом и с маховиковым НЭ фирмы "BMW"

Примером использования НЭ, расположенного вне ТС, является схема использования накопителя кинетической энергии на линии троллейбуса [12], которая показана на рис. 3. В этой схеме ТС и НЭ обмениваются энергией при торможении и при разгоне ТС. При уменьшении запаса энергии в системе «ТС-НЭ» ниже допу-

стимого уровня запас энергии пополняется из контактной сети.

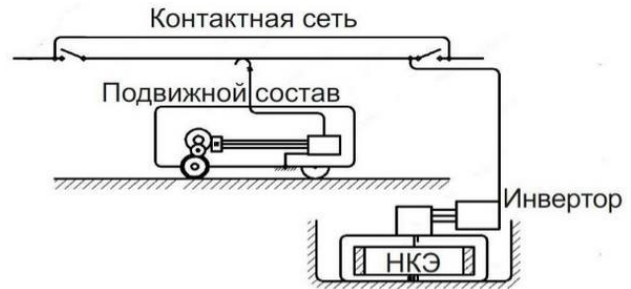


Рис. 3. Схема использования НЭ в троллейбусном транспорте.

На рис.4 показан общий вид конструкции маховикового НЭ, который используется на линии троллейбуса.

В настоящее время известно несколько типов НЭ: гравитационные твердотельные НЭ, гравитационные жидкостные НЭ, накопители механической энергии, накопители тепловой энергии, накопители электрической энергии, химические НЭ, магнитные НЭ и ряд других НЭ, которые пока не актуальны из-за их технического несовершенства.



Рис. 4. Общий вид конструкции маховикового НЭ, используемого в троллейбусной сети.

Маховики. Накопители механической энергии накапливают энергию в форме кинетической энергии вращательного движения тела, или в форме потенциальной энергии деформации упругих тел (пружин, воздуха). Из накопителей механической энергии наиболее подходящими по параметрам для ТС являются гироскопические НЭ, которые запасают энергию в форме кинетической энергии быстро вращающегося маховика [13,14].

Энергия, которую накапливает каждый килограмм маховика, значительно больше той энергии, которую можно накопить в одном килограмме статического груза, даже подняв его на очень большую, но реальную высоту. Последние разработки позволяют увеличить количество

накопленной энергии, до значений, близких к количеству химической энергии, которое содержится в единице массы наиболее энергоёмких видов химического топлива. Электромеханический маховиковый НЭ (рис. 5) состоит из кожуха, подшипников, вала, маховика и электрической машины.

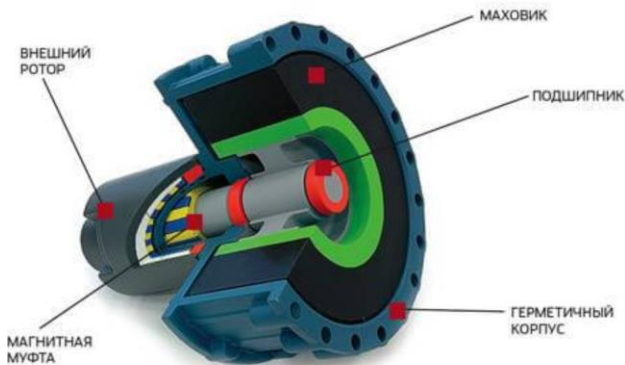


Рис. 5. Устройство супермаховика

Время хранения накопленной маховиком энергии относительно невелико и для упрощённых конструкций обычно составляет от нескольких минут до нескольких часов. Это обусловлено наличием потери энергии, затрачиваемой на преодоление силы трения в подшипниках и на преодоление силы сопротивления воздуха. Для уменьшения потери энергии применяют магнитную подвеску маховика и герметичный вакуумированный кожух, в котором вращается маховик. Это позволяет увеличить время хранения энергии до нескольких месяцев.

Поскольку маховики чувствительны к сотрясениям и поворотам в плоскостях, отличных от плоскости вращения маховика, и при этом возникают большие гироскопические силы, то для установки маховика используют 3-степенной карданный подвес. Кроме того, при вращении маховика на него действуют центробежные силы, которые вызывают деформацию маховика. Если центробежные силы превышают силы упругости, возникающие в маховике, то маховик разрушается. Таким образом, основной причиной разрушения маховика является его деформация под действием центробежных сил. Поэтому важно определить условия, при которых центробежные силы достигают граничных значений, при превышении которых начинается разрушение маховика. Для этого представим маховик в виде тонкостенного кольца [7]. Значение запасённой в тонкостенном кольце кинетической энергии можно определить по формуле:

$$E = \frac{J\omega^2}{2}, \quad (1)$$

где J – момент инерции тонкостенного кольца относительно оси вращения; ω – угловая скорость вращения тонкостенного кольца относительно оси вращения.

Значение момента инерции тонкостенного кольца относительно оси вращения можно определить по формуле:

$$J = m\rho^2, \quad (2)$$

где m – масса тонкостенного кольца; ρ – радиус вращения тонкостенного кольца относительно оси вращения.

Угловую скорость вращения тонкостенного кольца относительно оси вращения можно представить в виде:

$$\omega = \frac{V}{\rho}, \quad (3)$$

где V – линейная скорость элементов тонкостенного кольца.

После подстановки правых частей уравнений (2) и (3) в формулу (1) получим:

$$E = \frac{mV^2}{2}. \quad (4)$$

Из формул (1) и (4) следует, что для увеличения кинетической энергии тонкостенного кольца необходимо увеличивать его массу и скорость вращения до максимально возможных значений.

Можно показать, что значение механического напряжения σ , которое возникает во вращающемся тонкостенном кольце, можно определить по формуле [7]:

$$\sigma = \gamma V^2, \quad (5)$$

где σ – механическое напряжение, возникающее в тонкостенном кольце, Н/м^2 ; γ – плотность материала, из которого состоит маховик, кг/м^3 , V – линейная скорость вращения рассматриваемого тонкостенного кольца, которое входит в состав маховика, м/с .

Разрушение тонкостенного кольца произойдет, когда величина механического напряжения σ достигнет предела прочности материала σ_B , из которого маховик изготовлен. Из уравнения (5) можно рассчитать предельную допустимую скорость $V_{\text{ПРЕД}}$, которая соответствует пределу прочности материала σ_B , из которого изготовлен маховик:

$$V_{\text{ПРЕД}} = \sqrt{\frac{\sigma_{\text{В}}}{\gamma}}. \quad (6)$$

Если скорость V превысит предельную скорость $V_{\text{ПРЕД}}$, то это приведёт к разрушению маховика.

Отношение предела прочности материала $\sigma_{\text{В}}$ к плотности γ называется удельной прочностью $\sigma_{\text{уд}}$ материала:

$$\sigma_{\text{уд}} = \frac{\sigma_{\text{В}}}{\gamma}. \quad (7)$$

Из уравнений (6) и (7) следует:

$$V_{\text{ПРЕД}} = \sqrt{\sigma_{\text{уд}}}. \quad (8)$$

Следовательно, предельно допустимая скорость вращения маховика равна квадратному корню из его удельной прочности.

Формула (4) определяет величину энергии маховика. При этом удельная энергия единицы массы маховика (одного килограмма), равна:

$$e = \frac{E}{m} = \frac{V^2}{2}. \quad (9)$$

Предельную величину энергии $e_{\text{ПРЕД}}$, которую в состоянии накопить каждый килограмм массы маховика, можно рассчитать по формуле (9), в которую вместо V следует поставить предельное значение скорости $V_{\text{ПРЕД}}$ из формулы (8):

$$e_{\text{ПРЕД}} = \frac{\sigma_{\text{уд}}}{2}. \quad (10)$$

Таким образом, максимальная удельная энергия, которую может накопить маховик, однозначно определяется удельной прочностью материала, из которого он изготовлен. Из формулы (7) следует, что при одинаковом пределе прочности двух материалов ($\sigma_{\text{В}}$) большую удельную прочность имеет более легкий из них. Значит, для того чтобы сделать маховик максимально энергоёмким, его нужно делать не из тяжелого, а из легкого, но прочного материала. Это позволит разогнать маховик до большей скорости и, таким образом, позволит накопить больше энергии, не смотря на меньший вес маховика. Следовательно, супермаховики (маховики, способные запасать очень большое количество энергии) нужно делать из сверхпрочных и легких материалов. Сопоставим значения удельной прочности некоторых материалов, которые приведены в таблице 1 [8,9]. Из этой таблицы следует, что лучше всего для изготовления супермаховиков подходят композитные материалы, в частности

органоластики. Они обладают наибольшей удельной прочностью из всех известных конструкционных материалов. С учётом формулы (10) можно утверждать, что каждый килограмм маховика, изготовленного из органоластика, способен накопить в 14 раз больше энергии, чем маховик, изготовленный из вольфрама. Это связано с тем, что большая прочность и малая плотность органоластика позволяют раскручивать изготовленные из него маховики до огромной скорости, тогда как вольфрамовые маховики разрушаются при сравнительно низких значениях скорости вращения.

Таблица 1.

Основные параметры некоторых материалов

Материал	$\sigma_{\text{В}}$, Па	γ , кг/м ³	$\sigma_{\text{уд}}$, Па/(кг/м ³)	Модуль упругости, Па
Легированная сталь	1500×10^6	7800	$0,192 \times 10^6$	20×10^{10}
Алюминиевые сплавы	600×10^6	2700	$0,222 \times 10^6$	7×10^{10}
Титановые сплавы	1500×10^6	4500	$0,333 \times 10^6$	11×10^{10}
Вольфрамовые сплавы	1500×10^6	19300	$0,078 \times 10^6$	39×10^{10}
Композитные материалы:				
Бороалюминий	1400×10^6	2700	$0,519 \times 10^6$	150×10^{10}
Углеалюминий	1000×10^6	2300	$0,435 \times 10^6$	15×10^{10}
Углепластики	1400×10^6	1550	$0,903 \times 10^6$	12×10^{10}
Органоластики	1500×10^6	1380	$1,087 \times 10^6$	3×10^{10}
Кевлар-49	3600×10^6	1500	$2,427 \times 10^6$	13×10^{10}

Основным недостатком органоластиков является низкая жесткость. Поэтому при высокой скорости вращения маховики из органоластиков склонны к деформации и к расслоению.

Из таблицы 1 также видно, что по удельной энергоёмкости к органоластикам приближаются углепластики. Хотя они имеют несколько меньшую удельную прочность, их жёсткость в 4 раза больше, а это означает, что маховики из углепластиков меньше деформируются.

В настоящее время начинают широко использоваться волокна из кевлара. Они имеют прочность при растяжении 3000-4000 МПа, легко подвергаются переработке, их выпуск растёт, а цена – уменьшается.

Поскольку основным недостатком органоластиков является низкая жесткость, то к органическим волокнам добавляют более жесткие углеродные волокна и получают так называемые

гибридные композиты, которые содержат несколько видов волокон. Если у волокон марки Кевлар-49 модуль упругости равен 13×10^{10} Па, то у углеродных волокон он равен $(20-70) \times 10^{10}$ Па при пределе прочности – $(1000-3500) \times 10^6$ Па. Поэтому использование углеродных волокон позволяет изготовить ещё более энергоёмкий маховик.

Отметим, что системы с супермаховиками не только помогают экономить энергию, теряемую при торможении ТС, но и сами могут использоваться в качестве источника механической энергии. С помощью приведенных ранее формул не трудно подсчитать, что супермаховик массой 127 кг и диаметром 1,41 м при частоте вращения 25000 об/мин имеет кинетическую энергию 30 кВт×час. Этой энергии достаточно для того, чтобы обеспечить движение полностью загруженного пассажирами маршрутного автобуса суммарной массой 8200 кг со скоростью 20 км/ч (при наличии силы сопротивления движению 1533 Н) на расстояние 70,5 км, а при скорости движения того же автобуса 60 км/час (при наличии силы сопротивления движению 2170 Н) он переместится на расстояние 49,8 км. Такое же расстояние пройдёт электробус с аналогичными техническими характеристиками при использовании свинцово-кислотной аккумуляторной батареи массой 1 т или при использовании литий-ионной аккумуляторной батареи массой 300 кг (таблица 3). Как видим, 1 кг маховика может запасать (2,3 – 7,9) раза больше энергии, чем современный электрический аккумулятор такой же массы. Удельное значение энергии, запасённой в рассмотренном маховике, равно 0,85 МДж/кг.

Современные конструкции супермаховика из кевларового волокна с вакуумной камерой вращения и магнитным подвесом обеспечивают удельное значение запасённой энергии более 5 МДж/кг. Отметим, что бензин, имеет удельную теплоту сгорания 44,6 МДж/кг [13], что значительно превышает удельное значение энергии супермаховика из кевларового волокна. Однако по прогнозам, использование сверхпрочного волокна при изготовлении супермаховиков позволит увеличить удельное значение запасаемой энергии до 2-3 ГДж/кг. В этом случае запаса энергии, накопленной в таком маховике массой 100 кг, будет достаточно, чтобы ранее рассмотренный автобус проехал расстояние около 100000 км со скоростью 60 км/час.

Необходимо обратить внимание на то, что по мере накопления или по мере отдачи энергии скорость вращения маховика изменяется. В то же время требуется регулировать скорость движения ТС в соответствии с текущей обстановкой

независимо от скорости, с которой вращается маховик. По этой причине чисто механические системы передачи энергии, которые решают эту проблему, очень сложны в изготовлении. Для решения этой проблемы можно использовать электромеханическую передачу энергии с использованием мотор-генератора, размещённого на одном валу с маховиком (рис. 5) или связанного с ним редуктором. При этом накопленная механическая энергия преобразуется и передаётся в форме электрической энергии [11-14]. При преобразовании механической энергии в электрическую энергию и обратно появляются дополнительные потери энергии. Причём эти потери энергии, как правило, превышают потери энергии в редукторах или в вариаторах. К достоинствам систем с маховиковым НЭ и с электромеханической передачей энергии можно отнести то, что они могут накапливать энергию достаточно быстро (с достаточно большой мощностью), например, они могут всю кинетическую энергию ТС при его торможении преобразовать в кинетическую энергию маховика и также быстро передать её в обратном направлении.

Помимо накопителей кинетической энергии, в которых используются маховики, распространены механические накопители потенциальной энергии, в которых используется сила упругости. Накопители потенциальной энергии при одинаковых массогабаритных характеристиках уступают накопителям кинетической энергии по энергоёмкости. При этом накопители потенциальной энергии в отличие от сверхскоростных маховиков гораздо менее чувствительны к внешним факторам и обладают значительно большим временем хранения энергии.

Пневматические НЭ. В пневматических НЭ энергия накапливается за счёт упругости сжатого газа [15,16]. При избытке энергии (например, при торможении ТС) компрессор закачивает газ в баллон. При разгоне ТС сжатый газ подаётся в турбину, которая выполняет необходимую механическую работу. Иногда вместо турбины используют поршневой двигатель. Удельное значение энергии, запасённой в форме газа, сжатого до давления 50 атмосфер, может достигать 80 кДж/кг (22 Вт×час./кг), что сопоставимо с удельным значением энергии, запасённой в электро-химических аккумуляторах. Пневматические НЭ могут обеспечить хранение энергии в течение практически неограниченного времени (десять лет). Потенциально, такой способ накопления энергии вполне пригоден для ТС, но пневматические НЭ не могут накапливать энергию достаточно быстро (с достаточно большой мощностью). Например, при быстром тор-

можении ТС пневматические НЭ не успевают в течение нескольких секунд всю кинетическую энергию ТС преобразовать с помощью компрессора в потенциальную энергию сжатого газа. Однако пневматические НЭ можно использовать на ТС, у которых процесс торможения длится несколько минут или несколько десятков минут, например, на электропоездах. Срок службы пневматических НЭ может составлять 20 и более лет.

Накопители тепловой энергии. В принципе благодаря наличию теплоёмкости материи, смены фазового состояния вещества и фазовых переходов второго рода возможно накопление энергии в тепловой форме [11]. Удельное значение энергии, запасённой в форме тепла, равно 58 Вт×час./кг, но сроки её сохранения будут весьма ограниченными, а процесс преобразования тепловой энергии в механическую энергию имеет КПД (7-10)%. Поэтому накопители тепловой энергии в ТС, как правило, не используются.

Конденсаторы. В настоящее время электричество является наиболее удобной и универсальной формой энергии. Поэтому накопители электрической энергии развиваются наиболее быстро. Наиболее известными и наиболее используемыми недорогими накопителями электрической энергии являются электролитические конденсаторы. Удельное значение энергии, запасённой в электролитических конденсаторах, невелико и достигает значения 0,26 кДж/кг (0,0724 Вт×час./кг). Срок службы достигает 20 лет.

Ионисторы. Вторым типом накопителей электрической энергии являются ионисторы (суперконденсаторы) [10,11,12,17,18]. Основные параметры суперконденсаторов фирмы Iohus, которые используются в качестве накопителей электрической энергии, приведены в таблице 2.

Таблица 2.
Основные параметры суперконденсаторов Iohus

Параметры	RSC2R 7107SR	iRB1250 K270CT
Номинальная ёмкость, Ф	100	1250
Длительный ток, А	13	120
Пиковый ток (1 с), А	97	1800
Энергоемкость, Вт×час.	0,101	1,25
Удельное значение энергии, Вт×час./кг.	5,3	4,4
Пиковая удельная мощность, кВт/кг	25	28
Ток утечки, не более, мА	0,27	1

К положительным свойствам конденсаторов и ионисторов можно отнести практически неограниченное количество циклов «заряд-разряд» и то, что они могут накапливать и отдавать энер-

гию достаточно быстро (с достаточно большой мощностью). К недостаткам электролитических конденсаторов можно отнести малое удельное значение запасаемой энергии и малое время хранения энергии. У ионисторов эти параметры значительно лучше.

Аккумуляторы. Ионисторы по ряду важных параметров уступают электрохимическим аккумуляторам, в которых электрическая энергия переводится в химическую энергию и обратно [19]. Сравнительные характеристики некоторых наиболее распространённых электрохимических аккумуляторов представлены в таблице 3.

Таблица 3.
Основные параметры некоторых аккумуляторов

Параметры	Свинцово-кислотные	NiMH	Li ion
Удельное значение энергии, Вт×час./кг	30-50	60-120	90-190
Ток разряда, А (относительно ёмкости С)	5С	4С	3С-10С
Ток заряда, А (относительно ёмкости С)	0,1С	0,1С	0,2С-1С
Саморазряд/месяц, %	5	30	<5
Допустимое количество циклов «заряд-разряд»	200-300	300-500	500-2000
Внутреннее сопротивление, мОм	100 (блок 12 В)	200-300 (блок 6 В)	25-300 на элемент

Существует много типов аккумуляторов, каждый из которых имеет свои преимущества и свои недостатки. В последнее время на гибридных электромобилях применяют литий-ионные аккумуляторы [20]. Эти аккумуляторы имеют меньше вес и большое удельное значение запасаемой энергии по сравнению со свинцово-кислотными аккумуляторами. Они позволяют практически полностью использовать свою номинальную ёмкость, считаются более надёжными и имеют относительно большой срок службы. Их энергетическая эффективность в полном цикле превышает 90%, в то время как энергетическая эффективность свинцо-кислотных аккумуляторов при наличии заряда, который соответствует 20% ёмкости аккумулятора, может падать до 50%.

К достоинствам аккумуляторов можно отнести то, что они могут отдавать энергию доста-

точно быстро (с достаточно большой мощностью), что важно при разгоне ТС.

К недостаткам аккумуляторов можно отнести то, что они не могут накапливать энергию достаточно быстро (с достаточно большой мощностью), например, они не могут всю кинетическую энергию ТС при быстром торможении (в течение нескольких секунд) преобразовать в электрохимическую энергию аккумулятора. Поэтому большая часть кинетической энергии ТС будет потеряна. Кроме того, при превышении допустимых значений тока заряда и разряда аккумуляторов их технические характеристики начинают быстро ухудшаться. Аккумуляторы допускают ограниченное количество циклов «заряд-разряд», после чего их энергетические характеристики также начинают быстро ухудшаться.

При выборе накопительной системы для электрического ТС следует учитывать [11,22]:

- удельное значение накапливаемой энергии, Вт×час./кг или Дж/кг;
- удельную стоимость НЭ (удельные капиталовложения);
- долговечность НЭ, измеряемую общим числом циклов «заряд-разряд» или сроком службы;
- время заряда НЭ, которое должно быть согласовано с продолжительностью торможения ТС;
- время и величина потерь энергии при её хранении в НЭ;
- КПД накопительного устройства.
- диапазон температуры, в котором сохраняется работоспособность НЭ;
- простоту и доступность технического обслуживания НЭ;
- безопасность работы НЭ;

Следует отметить преимущества электромеханических НЭ (система «маховик – мотор-генератор») перед остальными НЭ, которые заключаются в высокой экологичности и долговечности, и в обладании самой высокой удельной мощностью при приёме и отдаче энергии [13,14]. К основным достоинствам электромеханических НЭ можно отнести:

- высокую удельную мощность;
- высокую удельную плотность запасенной энергии;
- отсутствие существенного влияния циклов «заряда-разрядов» на срок эксплуатации НЭ;
- малое отрицательное воздействие на окружающую среду.

Можно обратить особое внимание на условия эксплуатации НЭ на космических аппаратах, обусловленных наличием невесомости, вакуума и большого диапазона изменения температуры за

бортом космического аппарата. В этих условиях использование электрохимических НЭ затруднено из-за сложности обслуживания и их чувствительности к вышеперечисленным факторам. Для маховиковых НЭ перепады температуры не критичны, наличие вакуума уменьшает потери энергии и, следовательно, способствует увеличению времени хранения энергии, а наличие невесомости упрощает конструкцию подвески маховика.

В таблице 4 приводятся сравнительные оценки основных параметров наиболее прогрессивных видов НЭ с одинаковой номинальной мощностью 120 кВт. Следует отметить, что для супермаховиков теоретическая верхняя граница максимальной энергетической емкости в десятки раз выше, чем та, что приводится в таблице 4, а энергетическая емкость ионно-литиевых аккумуляторов практически подошла к своему теоретическому пределу.

Кроме рассмотренных НЭ существуют сверхпроводящие НЭ [11], в которых энергия запасается в сверхпроводящем кольце. В виду сложности поддержания низкой температуры сверхпроводящего кольца (пока нет приемлемых по стоимости сверхпроводящих материалов, работающих при относительно высокой температуре) использование в настоящее время этих НЭ проблематично, тем более на электротранспорте.

Таблица 4.
Характеристики трёх систем накопления энергии для электротранспорта

Тип накопителя	Маховик	Ионистор	Аккумулятор Li ion
Производитель	GKN	Maxvell Boostcap	A123Systems
Номинальная мощность, кВт	120	120	120
Энергетическая ёмкость, Вт×час.	456	647	26400
Допустимое количество циклов «заряд-разряд»	>10 ⁶	~10 ⁶	~1000
Удельная энергия, Вт×час/кг	8,3	1,75	110
Масса системы, кг	55	370	240

Выводы

1. Дальнейший прогресс в развитии практически всех типов НЭ связан, в первую очередь, с появлением новых материалов, имеющих луч-

шие технические характеристики. В настоящее время наилучшими или наиболее перспективными системами аккумуляирования энергии для всех видов транспорта, следует считать литиевые аккумуляторы и НЭ на базе суперконденсаторов и маховиков, а также пневматические НЭ, которые имеют большие конкурентные преимущества перед другими типами современных НЭ.

2. Анализ технических параметров аккумуляторов показал, что их срок службы весьма ограничен. Аккумуляторы допускают ограниченное количество циклов «заряд-разряд», после чего их технические характеристики начинают быстро ухудшаться и приходится менять дорогостоящую аккумуляторную батарею (АБ). Это сразу увеличивает стоимость эксплуатации ТС. Для увеличения срока службы АБ необходимо её заряд и разряд проводить в режиме, близком к оптимальному, а это значит, что ток и мощность заряда и разряда АБ должна быть ограничена на сравнительно невысоком уровне. Кроме того, необходимо обеспечить такой режим эксплуатации АБ, при котором цикл «заряд-разряд» происходил бы как можно реже. Из этого следует, что АБ желательно использовать только в качестве источника электрической энергии заряжая их только после их разряда до уровня, который является оптимальным по условию увеличения количества энергии, которое можно накапливать и получать от используемой АБ за весь срок её эксплуатации.

3. Поскольку скорость электрохимических реакций, протекающих в АБ при её заряде, невелика, то АБ не способны накапливать большое количество энергии в течение нескольких секунд, которые в большинстве случаев длится процесс торможения ТС. В результате этого большая часть кинетической энергии ТС будет потеряна. Поэтому АБ нежелательно использовать в НЭ, которые предназначены для работы в режимах «разгон-торможение» ТС. То же самое относится и к пневматическим НЭ.

4. В отличие от АБ маховики и ионисторы могут накапливать и отдавать сравнительно небольшое количество энергии с большой мощностью. Кроме того, количество циклов «заряд-разряд» для них практически неограничено. Поэтому маховики и ионисторы желательно использовать в качестве НЭ, которые предназначены для работы в режимах «разгон-торможение» ТС.

5. Таким образом, для повышения эффективности процесса сохранения энергии при эксплуатации ТС необходимо использовать несколько типов НЭ. В процессе движения ТС АБ

должна работать только в режиме источника электрической энергии, отдавая энергию с мощностью, не превышающей допустимых для неё значений. Заряжать АБ можно только после её разряда до оптимального уровня. Заряд АБ желательно проводить в стационарных условиях и только в оптимальном режиме. Таким образом, будет продлён срок службы АБ, и АБ будет максимально использоваться по количеству накапливаемой и отдаваемой энергии. В режимах быстрого разгона и торможения ТС в основном должны работать НЭ, в состав которых входят ионисторы и маховики, имеющие значительно большую мощность и значительно больший срок службы по сравнению с АБ. При разгоне ТС энергия в основном должна потребляться от них, обеспечивая тем самым приемлемый или оптимальный ток разряда АБ. При торможении ТС основное количество рекуперированной энергии (а лучше вся рекуперированная энергия) должно поступать в маховики или в ионисторы, способные накапливать энергию с большой мощностью, обеспечивая при этом приемлемый ток заряда АБ (а лучше отсутствие тока заряда АБ). Следовательно, использование маховиков и (или) ионисторов в качестве НЭ позволит минимизировать количество теряемой энергии при торможении ТС. В результате будет увеличен пробег ТС на одном заряде АБ.

5. На электропоездах, у которых процесс разгона и торможения длится несколько минут или несколько десятков минут, можно использовать пневматические НЭ, у которых срок службы в режиме «заряд-разряд» намного больше, чем у АБ. При быстром торможении ТС пневматические НЭ не успеют накопить всю кинетическую энергию ТС, поэтому при быстром торможении ТС должны работать НЭ, в состав которых входят ионисторы и маховики.

6. Большие возможности заключаются в развитии комбинированных систем аккумуляирования энергии с использованием супермаховиков, суперконденсаторов, пневматических НЭ и электрохимических аккумуляторов, каждый из этих НЭ дополняет другой по различным параметрам (по мощности и по КПД при приеме и при отдаче энергии, по количеству накапливаемой энергии, по времени хранения энергии и т.п.).

Список использованной литературы

1. Закон України «Про енергосбереження» від 26.07.1994 г. [Текст] // Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1994, N 30, ст.283.

2. Вершинін, Д. В. Визначення параметрів бортового джерела живлення транспортного засобу з електроприводом [Текст]/ Д. В. Вершинін,

- В. А. Водічев, В. А. Войтенко, Є. О. Смотров // Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-технічного журналу «ЕЛЕКТРОІНФОРМ». – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 406–407.
3. Вершинин, Д. В. Система регулювання тока батареї конденсаторов бортового источника питания электротранспортного средства [Текст]/ Д. В. Вершинин, В. А. Войтенко, Е. А. Смотров// Електромашинобуд. та електрооблад. – Вип. 73. – К.: Техніка, 2009. – С. 43–49.
4. Войтенко, В. А. Некоторые аспекты работы автономного источника питания электротранспортного средства [Текст]/ В. А. Войтенко, Е. А. Смотров, Д. В. Вершинин// Електротехнічні та комп'ютерні системи. – Вип. 01(77). – К.: Техніка, 2010. – С. 6–12.
5. Вершинин, Д. В. Автономне джерело живлення для автоматизованого електроприводу електромобіля [Текст]/ Д. В. Вершинин, В. А. Водичев, В. А. Войтенко, П. М. Монтік, Є. О. Смотров // Автоматизація технологічних і бізнес-процесів. – Вип. 4. – 2010. – С. 8–12.
6. Войтенко, В. А. Оптимізація параметрів конденсаторної батареї автономного джерела живлення електропривода електромобіля. [Текст]/ В. А. Войтенко, В. А. Водічев // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск «Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика» науково-виробничого журналу – Вип. 3/2012 (19). – Кременчук: КрНУ, 2012. – С. 261–263.
7. Черныш, О. Теоретична механіка. Навчальний посібник. [Текст]/ О. Черныш, В. Яременко, М. Березовый, // Изд. Центр навчальної літератури, 2018. – 760 с.
8. Вишняков, Л. Р. Композиционные материалы : справочник [Текст]/ Л. Р. Вишняков и др.// АН УССР, Институт проблем материаловедения ; под ред. Д. М. Карпиноса.. Киев : Наука думка, 1985. – 592 с.
9. Бобылев, А. В. Механические и технологические свойства металлов. Справочник [Текст]/ А. В. Бобылев. М.: Металлургия, 1980. – 240с.
10. Колб, А. А. Аккумуляция энергии рекуперации электрифицированного транспорта с помощью емкостных энергонакопителей [Текст]/ А. А. Колб // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – ДНУЗТ, 2010. – С. 89–94.
11. Бут, Д. А. Накопители энергии: Учеб. пособие для вузов [Текст]/ Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкович. – М., 1991. – 400 с.
12. Степаненко, В. П. Энергоэффективность подземной локомотивной откатки с гибридными накопителями энергии [Текст]/ В. П. Степаненко, Л. Н. Сорин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – №6. – 2015. – С. 135–140.
13. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 11, Issue 2, February 2007, Pages 235–258. Flywheel energy and power storage systems [Text]/ Björn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon.
14. Energy and Buildings Volume 39, Issue 5, May 2007, Pages 599–604. Flywheel energy storage-An upswing technology for energy sustainability [Text]/ Haichang Liu, Jihai Jiang.
15. Vollaro, Roberto De Lieto, et al. "Energy and thermodynamical study of a small innovative compressed air energy storage system (micro-CAES)" [Text]/ Energy Procedia 82 (2015): 645–651.
16. Besharat, M. O. H. S. E. N., SANDRA C. Martins, and HELENA M. Ramos. "Evaluation of Energy Recovery in Compressed Air Energy Storage (CAES) Systems [Text]/ 3rd IAHR Europe Congress. Book of Proceedings, Portugal. 2014.
17. Journal of Energy Storage. Volume 17, Pages 1–540 (June 2018). Supercapacitors: Properties and applications [Text]/ Jiří Libich, Josef Máca, Jiří Vondrák, Ondřej Čech, Marie Sedlářková. – Pages 224–227.
18. Journal of Energy Storage. Volume 21 Pages 1–834 (February 2019). Review of supercapacitors: Materials and devices [Text]/ Poonam, Kriti Sharma, Anmol Arora, S.K. Tripathi. – Pages 801–825.
19. Journal of Energy Storage. Volume 17, Pages 1–540 (June 2018). A computationally efficient Li-ion electrochemical battery model for long-term analysis of stand-alone renewable energy systems [Text]/ Majid Astaneh, Rodolfo Dufo-López, Ramin Roshandel, Farzin Golzar, José L. Bernal-Agustín. – Pages 93–101.
20. Journal of Energy Storage Volume 17, (June 2018), Implementation of hybrid electric vehicle energy management system for two input power sources [Text]/ Pezhman Bayat, Alfred Baghrarian, Peyman Bayat. – Pages 423–440.
21. Der neue elektro – 3er von BMW – glied einer langen entwicklungskette. Kolloquium fahrzeug- und motorenteknik [Text]/ 15...17 Oktober 1991. Eurogress Aachen. – 47 p.
22. Zoran, S. New Generation of Electric Vehicles [Text]/ Stevic Zoran., 2012. – p.384.

References

1. Law of Ukraine "On energy saving" of July 26, 1994 [Zakon Ukrainy «Pro enerhosberezhennya»], Vestomosti of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 1994, N 30, p.283.
2. Vershinin, D. V., Vodichev, V. A., Voitenko, V. A., Smotrov E. A. (2009) "Determination of the parameters of the on-board power supply of the vehicle with electric drive" [Viznachennya parametriv bortovogo dgerela givlennya transportnogo zasobu z elektroprivodom], Thematic Issue "Problems of an automated electric drive. Theory and Practice "of the scientific and technical journal" ELECTROINFORM ". – Lviv: EKOinform, p.p. 406–407.
3. Vershinin, D. V., Voitenko, V. A., Smotrov E. A. (2009) "Current control system of a battery of capacitors of an onboard power source of an electric vehicle" [Systema regulirovaniya toka batareyi kondensatorov bortovogo istochnika pitaniya electrotransportnogo sredstva], Elektromashinobud. and electroblade, No. 73, p.p. 43–49.
4. Voitenko, V. A., Smotrov, E. A., Vershinin, D. V. (2010) "Some aspects of the operation of an autonomous power source of an electric vehicle" [Nekotoryye aspekty raboty avtonomnogo istochnika pitaniya elektrotransportnogo sredstva], Electrical engineering and computer systems, No. 01 (77), p.p. 6–12.
5. Vershinin, D. V., Vodichev, V. A., Voitenko, V. A., Montik, P. M., Smotrov E. O. (2010) "Autonomous power source for automated electric drive of an electric vehicle" [Avtonomne dzherelo zhyvlennya dlya avtomatyzovanoho elektroprivodu elektromobilya], Automation of technological and business processes, No. 4, p.p. 8–12.
6. Voitenko, V. A., Vodichev, V. A. (2012) "Optimization of the parameters of a condenser battery of an autonomous power supply of electric drive of an electric vehicle" [Optyimizatsiya parametriv kondensatornoyi batareyi avtonomnogo dzherela zhyvlennya elektroprivoda elektromobilya.], Electro-mechanical and energy-saving systems. Thematic issue "Problems of the automated electric drive. Theory and Practice of the Scientific and Production Magazine, No. 3/2012 (19), p.p. 261–263.
7. Chernysh, O. et. al. (2018) Theoretical mechanics. Primary career. [Teoretichna mehanika. Navchalniy posibnik], Ed. Center for professional literature, 760p.
8. Vishnyakov, L. R. et. al. (1985) "Composite materials: handwritten" [Kompozitsionniye materialy], Academy of Sciences of the USSR, Institute of Materials Science, Kiev, 592p.
9. Bobylev, A.V. (1980) "Mechanical and technological properties of metals. Reference book" [Mekhanicheskiye i tekhnologicheskiye svoystva metallov. Spravochnik], Metallurgy, Moskva, 240p.
10. Kolb, A. A. (2010) "Accumulation of the recirculation energy of the electrified transport with the help of capacitive energy storage devices" [Akumulirovaniye energii rekuperatsii elektrifitsirovannogo transporta s pomoshch'yu yemkostnykh energonakopiteley], Science and transport progress. Bulletin of the Dnepropetrovsk National University of Railway Transport, p.p. 89–94.
11. But, D. A., Alyevsky, B. L., Myzuryn, C. R., Vasukovych, P. V. (1991) "Energy storage: Learning allowance for high schools" [Nakopiteli energii: Ucheb. posobiye dlya vuzov], Moskva, 400 p.
12. Stepanenko, V. P., Sorin, L. N. (2015) "Energy efficiency of underground locomotive rolling with hybrid energy storage" [Energoeffektivnost' podzemnoy lokomotivnoy otkatki s gibridnymi nakopitelyami energii], Mountain information and analytical bulletin (scientific and technical journal), No.6, p.p. 135–140.
13. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 11, Issue 2, February 2007, Pages 235–258. Flywheel energy and power storage systems. Björn Bolund, Hans Bernhoff, Mats Leijon.
14. Energy and Buildings Volume 39, Issue 5, May 2007, Pages 599–604. Flywheel energy storage-An upswing technology for energy sustainability. Haichang Liu, Jihai Jiang.
15. Vollaro, Roberto De Lieto, et al. (2015). "Energy and thermodynamical study of a small innovative compressed air energy storage system (micro-CAES)." Energy Procedia 82: 645–651.
16. Besharat, M. O. H. S. E. N., SANDRA C. Martins, and HELENA M. Ramos. "Evaluation of Energy Recovery in Compressed Air Energy Storage (CAES) Systems." 3rd IAHR Europe Congress. Book of Proceedings, Portugal. 2014.
17. Journal of Energy Storage. Volume 17, Pages 1–540 (June 2018). Supercapacitors: Properties and applications. Jiří Libich, Josef Máca, Jiří Vondrák, Ondřej Čech, Marie Sedlářková. – Pages 224–227.
18. Journal of Energy Storage. Volume 21 Pages 1–834 (February 2019). Review of supercapacitors: Materials and devices. Poonam, Kriti Sharma, Anmol Arora, S.K. Tripathi. – Pages 801–825.
19. Journal of Energy Storage. Volume 17, Pages 1–540 (June 2018). A computationally efficient Li-ion electrochemical battery model for long-term analysis of stand-alone renewable energy systems. Majid Astaneh, Rodolfo Dufo-López, Ramin Roshandel, Farzin Golzar, José L. Bernal-Agustín. – Pages 93–101.
20. Journal of Energy Storage Volume 17, (June 2018), Implementation of hybrid electric vehicle

energy management system for two input power sources, Pezhman Bayat, Alfred Baghrmian, Peyman Bayat. – Pages 423–440.

21. The new electro - 3 from BMW - is part of a long development chain. Colloquium vehicle and

engine technology. 15...17 Oktober 1991. Eurogress Aachen. – 47 p.

22. Zoran, S. (2012) “New Generation of Electric Vehicles”, – 384 p.

ENERGY ACCUMULATION SYSTEMS IN ELECTRIC TRANSPORT

V. A. Voytenko¹, K. I. Semenov², M. V. Matkovsky¹

¹Odessa National Polytechnic University

²Odessa National University I. I. Mechnikov

Abstract. Considered known systems of energy storage in electric transport, their specific parameters, resource, economic and environmental aspects. Their comparative analysis of possibilities is conducted! Application of different types of accumulators in different types of transport, on the basis of which are made Conclusions on Trends in the development of accumulators, on the basis of which formulate recommendations for the Choice of accumulators in for some specific transport messages and their structural features. It has been shown that inertial energy accumulation systems are already widely used in energy recovery in electric transport and for equalization of load in traction networks. In this case, the use of accumulating systems with a flywheel in an electric vehicle is dangerous in saints with the risk of an imbalance. It is concluded that superconducting energy storage systems should be considered promising as their use is associated with many difficulties. It is recommended that when using any energy storage device, consider the considerable expenses necessary for the development and creation of energy storage and recovery systems, and begin practical work on their implementation after a comprehensive analysis of the possible benefits from their use in relation to additional equipment and maintenance costs, the possibility of upgrading existing energy storage devices, environmental aspects of use (at all stages, starting with the production of a power storage and ending with its utilization). The further progress in the development of virtually all types of drives, the authors associate, in the first place, with the emergence of new materials. It is concluded that at present, the most promising systems of energy storage for all types of transport, should be considered flywheel drives and drives based on super-capacitors. There are great opportunities, which consist in the development of combined energy storage systems using super-flywheels, super-capacitors and electro-chemical accumulators, each of which complements another by different parameters.

Key words: electric transport, energy, power, energy storage, energy intensity; flywheel, batteries, specific parameters.

СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

V. A. Войтенко¹, К. І. Семенов², М. В. Матковський¹

¹Одеський національний політехнічний університет

²Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Анотація. Розглядаються відомі системи накопичення енергії в електротранспорті, їх питомі технічні параметри, ресурс та їх конструкційні особливості. Проводиться порівняльний аналіз різних типів накопичувачів енергії можливості їх застосування в різних видах транспорту, на підставі чого робляться висновки про тенденції розвитку накопичувачів, на підставі яких формулюються рекомендації щодо вибору накопичувачів в деяких конкретних видів транспорту і їх конструкційні особливості. Показано, що механічні та електромеханічні системи накопичення енергії вже широко використовуються при рекуперації енергії в електротранспорті. Рекомендується при використанні будь-якого накопичувача енергії враховувати чималі витрати, необхідні на розробку і створення систем накопичення та рекуперації енергії. Тому починати роботи по їх розробці і впровадженню треба після всебічного аналізу можливих вигод від застосування систем накопичування енергії враховуючі додаткові витрати на їх обладнання і експлуатацію. Окрім цього треба враховувати можливість модернізації існуючих накопичувачів енергії, а також екологічні аспекти їх використання на всіх етапах, починаючи з виробництва накопичувачів енергії та закінчуючи їх утилізацією. Подаль-

ший прогрес у розвитку практично всіх типів накопичувачів енергії автори пов'язують, в першу чергу, з появою нових матеріалів. Робиться висновок, що в даний час найбільш перспективними системами акумулювання енергії для всіх видів транспорту, слід вважати літієві акумулятори, маховикові накопичувачі енергії та накопичувачі енергії на базі іоністорів (супер-конденсаторів). Відзначаються великі можливості, які полягають у розвитку комбінованих систем накопичення енергії з використанням супер-маховиків, супер-конденсаторів і електрохімічних акумуляторів, кожен з яких доповнює інші за різними параметрами.

Ключові слова: електричний транспорт, енергія, потужність, накопичувач енергії, енергосмісткість; маховик, акумулятори, іоністори, питомі параметри.

Получено 25.02.2019.



Войтенко Владимир Андреевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением, Одесский национальный политехнический университет. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: elektrik.WA.@gmail.com, тел. +38-048-705-84-67.

Vladimir Voytenko, Ph.D, Associate Professor of the department of electromechanical systems with computer control, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine. E-mail: elektrik.WA.@gmail.com, tel. +38-048-705-84-67.

ORCID ID: 0000-0002-2525-6913.



Семенов Константин Иванович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник лаборатории физики аэродисперсных систем, Одесский национальный университет имени И.И.Мечникова. Ул. Дворянская, 2, Одесса, Украина, E-mail: semenovki@onu.edu.ua, тел. +38-066-4-942-267.

Konstantyn Semenov, Ph.D, Senior Researcher, Senior Researcher of Problem Laboratory of Physics of Aerodisperse Systems, Odessa National University I.I. Mechnikov Str. Dovzhenko 7a. Odessa, Ukraine, E-mail: semenovki@onu.edu.ua, tel. +38-066-4-942-267

ORCID ID: 0000-0002-3900-1831.



Матковский Максим Владимирович, аспирант кафедры электромеханических систем с компьютерным управлением, Одесский национальный политехнический университет. Просп. Шевченко, 1, Одесса, Украина, E-mail: matkovskii-maxim@gmail.com, тел. +38-048-705-8-467

Maksim Matkovsky, post-graduate of the department of electromechanical systems with computer control, Odessa National Polytechnic University, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: matkovskiiimaxim@gmail.com, tel. 066-698-51-13

ORCID ID: 0000-0001-9062-2433.