
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.355**О.С. Попель¹, А.Б. Тарасенко¹, А.А. Федотов^{1,2}, С.Е. Фрид¹****ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ
ГИБРИДНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ ПРИ ПУСКЕ ДВИГАТЕЛЯ В СЛУЧАЕ
ПОНИЖЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**¹ Объединенный институт высоких температур РАН² Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Для многих промышленных объектов, расположенных в северных регионах России, важной проблемой является запуск двигателей внутреннего сгорания, работающих на органическом топливе. Статья посвящена физическому моделированию работы электрической схемы стартера при запуске двигателя при пониженных температурах окружающей среды. В качестве объектов испытаний были использованы свинцово-кислотный, щелочные и литий-ионный аккумуляторы, а также их комбинации с параллельно соединенной суперконденсаторной батареей на основе органического электролита. Соотношение пускового тока и энергоемкости аккумуляторной батареи подобрано в соответствии с типичными рабочими условиями для стартерных батарей (ток в три раза превосходит значение энергоемкости аккумуляторной батареи, выраженное в ампер-часах). Физическое моделирование запуска проведено с использованием климатической камеры КХТ-450М. При этом выполнялся разряд указанным током аккумуляторной батареи или параллельно соединенных аккумуляторной и суперконденсаторной батарей в течение 4 с. Получены экспериментальные данные о работе различных типов аккумуляторов в пусковом режиме при отрицательной температуре, включая характерные для этого режима значения токов и напряжений, на основе которых в дальнейшем можно судить о деградационном поведении аккумуляторов. При $t = -23^{\circ}\text{C}$ ни одна из аккумуляторных батарей не обеспечила отдачу требуемого тока в течение 3 с, так как при этих попытках происходило падение напряжения ниже 8-10 В (нижняя граница допустимого напряжения выбиралась, исходя из рекомендаций производителей аккумуляторов). При параллельной работе с суперконденсаторной батареей емкостью 225 Ф требуемая отдача тока наблюдалась в экспериментах со всеми типами аккумуляторов. Таким образом, суперконденсаторная батарея существенно увели-

чивает вероятность успешного запуска двигателя в неблагоприятных погодных условиях. Наименьшее падение напряжения наблюдалось на никель-кадмиевой аккумуляторной батарее, комбинацию которой с суперконденсаторами можно считать оптимальным решением для работы в качестве стартерного модуля двигателя при отрицательных температурах. Вместе с тем, емкость суперконденсаторной батареи требует дальнейшей оптимизации.

Ключевые слова: гибридный накопитель, двигатель внутреннего сгорания, литий-ионный аккумулятор, свинцово-кислотный аккумулятор, суперконденсатор, физическое моделирование, холодный запуск двигателя, щелочной аккумулятор.

I. Введение

Запуск двигателя внутреннего сгорания является большой проблемой для использования транспортных средств, работающих на жидком органическом топливе в регионах с низкой среднегодовой температурой [1]. Стартовый крутящий момент двигателя в традиционном транспорте обеспечен встроенной электрохимической батареей, как правило, это свинцово-кислотная (Pb-кислота), реже – никель-кадмиевая (Ni-Cd) батарея [2]. Различные аккумуляторы энергии работают в области отрицательных температур по-разному, соответственно, различным образом происходит и потеря мощности и энергоемкости. Из-за резко возрастающего сопротивления электролита и замедления электродных процессов падение напряжения на аккумуляторе до критических с точки зрения рабочих напряжений потребителя значений происходит быстрее, чем аккумулятор отдает требуемую энергию. Для электрохимических двойнослойных суперконденсаторов потеря мощности при температурах вплоть до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ незначительна [3]. Большое количество заводов, рудников, месторождений полезных ископаемых в России находятся как раз в регионах с низкой среднегодовой температурой. Миллионы людей пользуются общественным транспортом, на месторождениях используется большое количество тяжелой техники, железнодорожные пути проходят по северным территориям, поэтому проблема гарантированного запуска двигателя при отрицательных температурах представляет определенный интерес [4].

II. Цели и задачи исследования

В рамках данной работы рассматриваются только вопросы, связанные с обеспечением необходимой электрической мощности для прокрутки вала, в то время как существуют и другие проблемы, связанные, например, с сохранением ресурса двигателя во время запуска при пониженных температурах [5]. Для решения проблемы запуска в ситуации, когда отдаваемый ток аккумулятора резко снижается, предлагается использовать гибридный накопитель электрической энергии, который состоит из суперконденсаторной и аккумуляторной батарей, суперконденсаторная батарея обеспечивает большой пусковой ток, в то время как аккумуляторная бата-

рея заряжает суперконденсаторную между попытками запуска. Комплектация стартерной батареи одними суперконденсаторами невозможна в силу низкой удельной энергоемкости последних и высокой стоимости запасенной энергии, поскольку, кроме запуска двигателя, на нее также возлагается питание ряда бортовых потребителей транспортного средства. В то же время использование суперконденсаторов помогает сохранить ресурс аккумуляторов, которые склонны к деградации при высоких токах. Цель данной работы – оценить возможность запуска двигателя от разных типов накопителей, в том числе и с использованием возможностей гибридной схемы.

III. Физическое моделирование

Различные схемы гибридных накопителей для транспортных средств представлены в [6]. Основными компонентами таких схем являются аккумуляторная и суперконденсаторная батареи, а также согласующие преобразователи. Наличие в схеме преобразователей позволяет более полно использовать возможности суперконденсаторов, так как минимизируется разница рабочих напряжений между батареями, что позволяет наиболее полно использовать энергию суперконденсаторной батареи, определяемую рабочим диапазоном напряжений. В то же время использование преобразователей увеличивает стоимость конечного изделия, а несовершенство преобразования энергии в них вносит свой вклад в ее потери. Надежность системы также снижается из-за возможности выхода из строя преобразователя. В данной работе рассматривалось прямое подключение аккумуляторной и суперконденсаторной батарей к шине постоянного тока параллельно друг другу. Блок-схема макета стартерного модуля приведена на рис. 1.

Для имитации нагрузочного режима использовался анализатор химических источников тока АСК150.24.1750.1 ООО «Яростанмаш», встроенный программатор которого позволяет задавать программы заряда-разряда химических источников тока [7]. В ряде опытов суперконденсаторная батарея была отключена для проверки возможностей аккумуляторной батареи по обеспечению запуска двигателя при пониженных температурах. Во время всех опытов аналогово-цифровыми преобразователями ОВЕН МВ110-224.2А регистрировались напряжения (через делители) и токи (через шунты) в цепях аккумуляторной и суперконденсаторной батарей и анализатора химических источников тока. Шаг записи данных модулем сбора данных ОВЕН МСД-200 – 1 с.

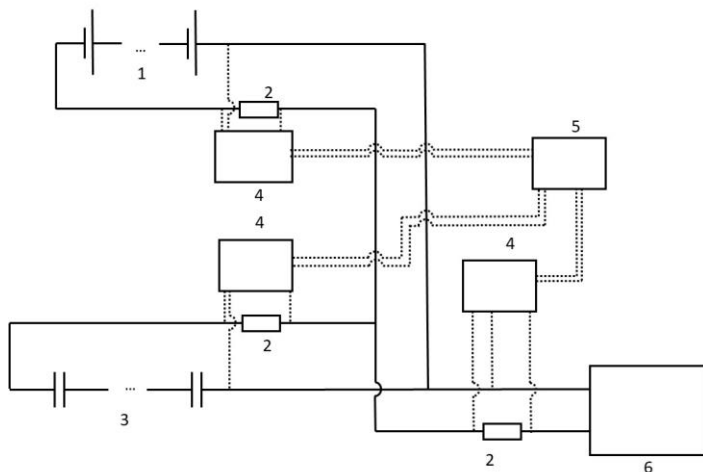


Рис. 1. Блок-схема макета гибридного накопителя электрической энергии для холодного запуска двигателя:

- 1 – аккумуляторная батарея; 2 – токовый шунт; 3 – суперконденсаторная батарея;
 4 – аналогово-цифровой преобразователь; 5 – модуль регистрации данных;
 6 – анализатор химических источников тока

Циклограммы реальных пусков показывают и более высокие значения пускового тока. Длительность таких воздействий составляет доли секунды, что не позволяет точно воспроизвести мощностную зависимость на имеющемся оборудовании. Стартерный ток не может быть достаточным условием для проворачивания вала двигателя при падении напряжения на источнике тока ниже определенного значения, обусловленного нижним пороговым напряжением стартера. Кроме того, снижение напряжения на аккумуляторной батарее до значений, определяемых типом аккумулятора, нежелательно по соображениям сохранения ее срока службы [8]. Для литий-ионных аккумуляторов это значение составляет 2,8 В/элемент (11,2 В для четырехэлементной батареи), свинцово-кислотные батареи большинства производителей не рекомендуется разряжать ниже 1,5 В/элемент (9 В для двенадцативольтовой батареи). Из-за широкого распространения именно свинцово-кислотных аккумуляторов и адаптации к ним напряжения бортовых сетей транспортных средств в данной серии экспериментов предельное нижнее значение напряжения было принято равным 9 В [9].

Несколько батарей из различных типов аккумуляторов были собраны для испытаний (табл. 1). Каждая батарея предварительно заряжалась током в 10% от номинальной емкости, выраженной в ампер-часах, примерно до 13 В, поскольку ситуация с полностью заряженными аккумуля-

торами при их фактическом использовании на транспортном средстве, реализуется крайне редко. После заряда каждая батарея выдерживалась в климатической камере КХТ-450М при $t = -23^{\circ}\text{C}$ двое суток. В опытах по имитации запуска двигателя от гибридного накопителя параллельно аккумуляторной батарее подключалась суперконденсаторная батарея, заряженная до 16 В. Использовалось изделие производства ООО «ТЭЭМП» с рабочим напряжением 16,2 В и номинальной емкостью 225 Ф. Во всех экспериментах предпринимались три подачи нагрузки на накопитель без дополнительных подзарядок продолжительностью по 4 с, но с выдержкой в 10-20 с между подключением нагрузки для восстановления напряжения на аккумуляторной батарее.

Таблица 1.
Параметры использованных аккумуляторных батарей

Батарея	Li-ion (LiNMC)	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-кислота
Расшифровка технологии	Литий-ионная (катодный материал – литированные смешанные оксиды)	Никель – металло-гидридая	Никель-кадмиевая	Свинцово-кислотная
Производитель	Sanyo	Camelion	Camelion	Delta Battery
Количество элементов в батарее, шт.	4	10	10	6 (поставляется собранной)
Номинальная емкость, А·ч	3,4	0,6	0,6	7,2
Номинальное напряжение, В	14,8	14	14	12
Рекомендуемое напряжение при заряде, В	16,8	15	15	14,6
Ток разряда в эксперименте, А	10,2	2	2	21

IV. Обсуждение результатов

Полученные в результате экспериментов зависимости напряжения от времени приведены на рис. 2 и 3. Ни одна из тестируемых аккумуляторных батарей не обеспечила устойчивой энергоотдачи в режиме имитации пуска двигателя сама по себе в заданных условиях из-за глубокой просадки напряжения. Наименьшее падение напряжения при этом показали свинцово-кислотные аккумуляторы. При параллельно присоединенной суперконденсаторной батарее, напротив, «пуск» обеспечивался при использовании любого из рассматриваемых типов аккумуляторов. При этом существенно повышалось (по сравнению с вариантом работы без супер-

конденсаторной батареи) напряжение на аккумуляторных батареях, что позволяет продлить их срок службы. Наихудшие результаты наблюдались для никель-металлогидридного аккумулятора. Падение напряжения на этой батарее было максимальным даже при работе в составе гибридного накопителя. При отсутствии преобразователей в электрической схеме возникает опасность бесконтрольного перераспределения энергетических потоков между аккумуляторной и суперконденсаторной батареями и разряда первой высокими токами. Поэтому были проанализированы потоки мощности и максимальные токи в ходе экспериментов с гибридной системой. Распределения мощности между источниками и нагрузкой для свинцово-кислотного аккумулятора с максимальными потоками мощности представлены на рис. 4, максимальные значения токов разряда аккумуляторной батареи (в относительных единицах C , являющихся отношением силы тока к емкости аккумулятора, выраженной в ампер-часах) – в табл. 2.

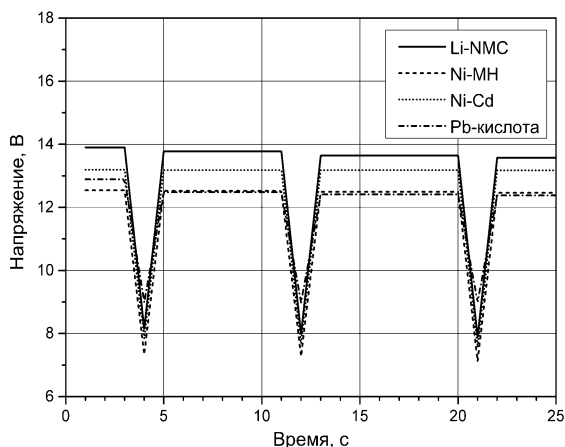


Рис. 2. Напряжение на аккумуляторных батареях во время имитации запуска двигателя без использования суперконденсаторной батареи

Определенное влияние на результаты эксперимента оказало то, что емкость суперконденсаторной батареи была одинаковой во всех опытах, а емкость аккумуляторных батарей и, соответственно, мощность нагрузки – разной. В случае никель-кадмиевой батареи разряд аккумуляторной батареи на суперконденсаторную начался в самом начале эксперимента в силу более высокого напряжения на данном типе аккумуляторов.

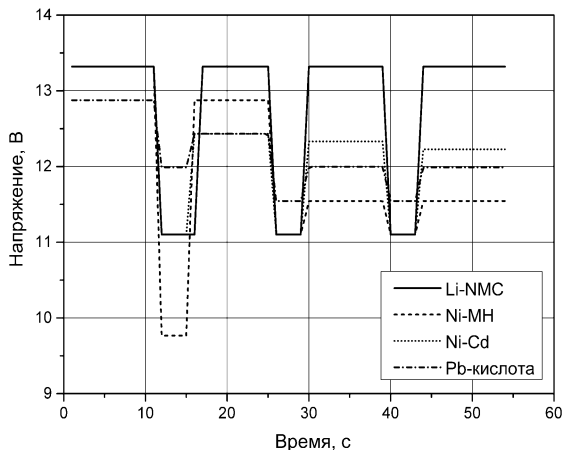


Рис. 3. Напряжение на аккумуляторных батареях во время имитации запуска двигателя с использованием суперконденсаторной батареи

При этом можно сказать, что никель-кадмиевая батарея на нагрузку практически не работала, а только компенсировала разряд и саморазряд суперконденсаторной батареи. В случае литий-ионной батареи имел место дозаряд суперконденсаторной батареи в самом начале эксперимента и некоторая реакция на нагрузку в его ходе. Для никель-металлогидридной батареи эта реакция практически незаметна, видимо из-за сильных просадок напряжения при низкой температуре – напряжение на суперконденсаторной батарее почти всегда оказывалось выше. Наконец, в случае свинцово-кислотной батареи, где абсолютные значения тока и мощности выше всего, наблюдалась постоянная подзарядка суперконденсаторной батареи от аккумуляторной. Вместе с тем, токи заряда аккумуляторной батареи от суперконденсаторной в отдельных случаях лишь незначительно превысили допустимые значения максимального тока разряда, рекомендованные производителями.

Таким образом, за счет более высокого напряжения разряда и меньших токов гибридный накопитель энергии позволяет продлить срок службы аккумуляторных батарей в режиме так называемого холодного пуска двигателя. В то же время различное поведение аккумуляторных батарей различной энергоемкости при одинаковой емкости суперконденсаторной батареи показывает, что для каждого типового значения тока разряда требуется оптимизация емкости суперконденсаторной батареи. Например, в случае никель-металлогидридной батареи подзаряд суперконденсаторной батареи почти не происходил, но все три попытки пуска были успешными.

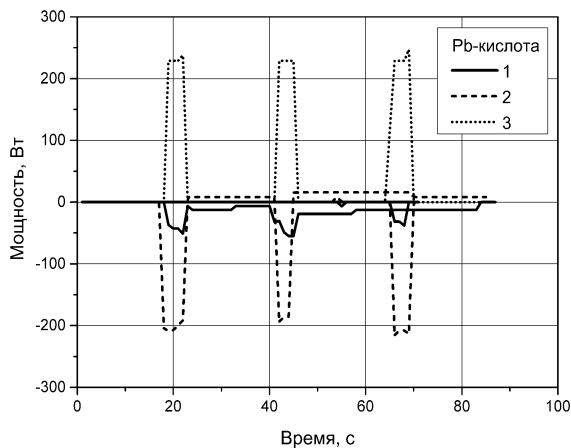


Рис. 4. Мощности в зависимости от времени в ходе экспериментов по имитации пуска двигателя от гибридного накопителя со свинцово-кислотным аккумулятором:
 1 – мощность аккумуляторной батареи;
 2 – мощность суперконденсаторной батареи; 3 – мощность нагрузки

Таблица 2.

Токи разряда аккумуляторных батарей в составе гибридного накопителя

Батарея	Li-ion (LiNMC)	Ni-MH	Ni-Cd	Pb-кислота
Рекомендуемый максимальный кратковременный ток, относительные единицы C	2	0,5	2	3
Максимальный ток в ходе экспериментов, относительные единицы C	0,7	0,6	0,8	0,7

Это свидетельствует о «переразмеренной» суперконденсаторной батарее, что в реальных устройствах недопустимо в силу высокой стоимости и неудовлетворительных массогабаритных характеристик суперконденсаторов. Дальнейшее развитие данной работы должно быть связано с подбором оптимальной емкости суперконденсаторной батареи с учетом токов, емкости и экономических показателей, характерных для применения на конкретном транспортном средстве.

V. Заключение

В рамках данной работы проведено физическое моделирование пуска двигателя транспортного средства от аккумуляторных батарей различ-

ных видов, а также гибридных накопителей, включающих в себя суперконденсаторную батарею, присоединенную параллельно аккумуляторной батарее. Опыты проводились с использованием климатической камеры, поддерживавшей $t = -23^{\circ}\text{C}$ как в ходе эксперимента, так и предварительной выдержки в течение двух суток перед экспериментом для стабилизации температуры батарей. Показано, что использование гибридного накопителя с суперконденсаторами существенно повышает вероятность успешного запуска двигателя по сравнению с аккумуляторной батареей для всех рассмотренных типов аккумуляторов.

В режиме гибридного накопителя наилучшие показатели (с точки зрения наименьшей просадки напряжения в ходе имитации попыток запуска) показал никель-кадмиевый аккумулятор, наихудшие – никель – металлгидридный. Также показано, что в режиме гибридного накопителя для всех типов аккумуляторов достигаются относительно низкие токи нагрузки и относительно высокие напряжения разряда, что должно благотворно сказаться на сроке службы аккумуляторных батарей.

Основным недостатком выполненной работы следует считать использование суперконденсаторной батареи фиксированной емкости, поэтому в развитии данного подхода необходимы расчетно-аналитические и экспериментальные исследования, направленные на оптимизацию емкости суперконденсатора (с учетом значительных массогабаритных характеристик и высокой удельной стоимости) для конкретных применений.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Арктика – научные основы новых технологий освоения, сохранения и развития».

© Попель О.С., 2018

© Тарасенко А.Б., 2018

© Федотов А.А., 2018

© Фрид С.Е., 2018

Библиографический список

- [1] Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Тарасенко А.Б. Климатические аспекты создания фотоэлектрических светосигнальных устройств на возобновляемых источниках энергии // Альтернативная энергетика и экология. 2015. № 10-11. С. 98-106.
- [2] Gelbke M., Mondoloni C. Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): State-of-the-art, в Lead-Acid batteries for future automobiles. Elsevier, 2017. С. 149-184.

- [3] Попель О.С., Тарасенко А.Б. Гибридные накопители электрической энергии: их особенности и применение (Обзор) // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 27-44.
- [4] Beliakov A.I. Starting of locomotive diesel engines using electrochemical capacitors // Advanced Capacitor World Summit 2003. Washington, DC.
- [5] Jis B., Tian G., Feng H., Zuo Z., Roskilly A.P. An experimental investigation into the starting process of free-piston engine generator // Applied Energy. 2015. № 157. С. 798-804.
- [6] Song Z., Hofmann H., Li J., Han X., Zhang X., Ouyang M. A comparison study of different semiactive hybrid energy storage system topologies for electric vehicles // J. Power Sources. 2015. № 274. P. 400-411.
- [7] ООО «Яростанмаш». [Электронная ресурс] // Режим доступа: <http://www.yarst.org/>. (Дата обращения 12.04.2018).
- [8] Vutetakis D.G., Batteries, в The avionics handbook, C.R. Spitzer, Ch. 10. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [9] Попель О.С., Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии // Энергоэксперт. 2011. № 3. С. 26-35.

O.S. Popel¹, A.B. Tarasenko¹, A.A. Fedotov^{1,2}, S.E. Frid¹

ELECTRIC ENERGY HYBRID STORAGE MODULE FOR ENGINE COLD CRANKING-PHYSICAL SIMULATION

¹ Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

² National Research Technology University «MPEI»,
Moscow, Russia

Abstract. For many industrial facilities located in the northern regions of Russia, an important issue is the start of internal combustion engines that run on organic fuel. The article is devoted to the physical modeling of the electrical circuit of the starter when the engine is started at low ambient temperatures. Lead-acid, alkaline and lithium-ion batteries were used as test objects, as well as their combination with an organic electrolyte-based supercapacitor battery connected in parallel. The ratio of the starting current and energy intensity of the battery is selected in accordance with the typical operating conditions for starter batteries (the current is three times greater than the value of energy intensity of the battery, expressed in ampere-hour). Physical simulation of the launch was carried out using the climate chamber KHT 450M. In this case, discharge was performed by the indicated current of the battery or parallel connected to the battery and supercapacitor batteries for 4 s. Experimental data were obtained on the operation of various types of batteries in the starting mode at negative temperatures, including the characteristic values of currents and voltages for this mode, on the basis of which later on we can judge the degradation behavior of batteries. At a temperature of minus 23° C, none of the batteries provided a return of the required current for 3 s, since these attempts resulted in a voltage drop below 8-10 V (the lower limit of the allowable voltage was selected based

on the recommendations of battery manufacturers). When operating in parallel with a 225 F supercapacitor battery, the required current return was observed in experiments with all types of batteries. Thus, a super-capacitor battery significantly increases the likelihood of a successful engine start in adverse weather conditions. The smallest voltage drop was observed on a nickel-cadmium battery, the combination of which with supercapacitors can be considered the optimal solution for operating as a starter motor module at negative temperatures. However, the capacity of the super-capacitor battery requires further optimization.

Keywords: alkaline battery, engine cold cranking, hybrid drive, internal combustion engine, lithium-ion battery, lead acid battery, physical modeling, supercapacitor.

References

- [1] O.S. Popel, S.E. Frid, Yu.G. Kolomietz and A.B. Tarasenko, «Climate aspects for renewable-based photoelectric light and signal units development», *Alternate Energy and Ecology*, no. 10-11, pp. 98-106, 2015.
- [2] M. Gelbke and C. Mondoloni, «Flooded starting-lighting-ignition (SLI) and enhanced flooded batteries (EFBs): State-of-the-art», in *Lead-Acid batteries for future automobiles*. Elsevier, 2017, pp. 149-184.
- [3] O.S. Popel and A.B. Tarasenko, «Hybrid Electric Energy Storages: Their Specific Features and Application (Review)», *Thermal Engineering*, vol. 65, no. 5, pp. 266-281, 2018.
- [4] A.I. Beliakov, «Starting of locomotive diesel engines using electrochemical capacitors» in *proc. Advanced Capacitor World Summit 2003*, Washington, DC, Aug. 11-13, 2003.
- [5] B. Jia, G. Tian, H. Feng, Z. Zuo and A.P. Roskilly, «An experimental investigation into the starting process of free-piston engine generator», *Applied Energy*, vol. 157, pp. 798-804, Nov. 2015.
- [6] Z. Song, H. Hofmann, J. Li, X. Han, X. Zhang and M. Ouyang, «A comparison study of different semiactive hybrid energy storage system topologies for electric vehicles», *J. Power Sources*, vol. 274, pp. 400-411, 2015.
- [7] «Yarostanmash» LLC. [Online]. Available at: [http:// www.yarst.org/](http://www.yarst.org/). [Accessed: May 12, 2018].
- [8] D.G. Vutetakis, «Batteries», in *The avionics handbook*, C.R. Spitzer, ch. 10, Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
- [9] O.S. Popel and A.B. Tarasenko, «Electric energy storage», *Energexpert*, no. 3, pp. 26-35, 2011.