

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПРИНУДИТЕЛЬНОГО ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННОЙ БАТАРЕИ ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ВАРИАЦИЕЙ РАЗМЕРОВ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Хрипач Н.А., Коротков В.С., Шустров Ф.А.

Московский Политехнический Университет, г.Москва

Ключевые слова: математическое моделирование, метод конечных элементов, система охлаждения, аккумуляторная батарея.

Аннотация. В докладе описан процесс моделирования системы охлаждения батареи гибридного транспортного средства с целью выявления причин перегрева отдельных химических ячеек в процессе проведения лабораторных испытаний. На основании анализа влияния размеров конечных элементов и методики построения расчетной сетки определены оптимальные параметры модели, позволившие внести изменения в конструкцию батареи. Адекватность моделирования подтверждена результатами лабораторных испытаний батареи с измененной конструкцией.

SIMULATION OF FORCED AIR COOLING SYSTEM OF TRANSPORT LITHIUM-ION BATTERY WITH FINITE ELEMENT SIZE VARIATION

Khripach N.A., Korotkov V.S., Shustrov F.A.

Moscow Polytechnical University, Moscow

Keywords: mathematical modeling, finite element method, cooling system, battery.

Abstract. The report describes the process of modeling the battery cooling system of a hybrid vehicle in order to identify the causes of overheating of individual chemical cells during laboratory tests. Based on the analysis of the influence of finite element sizes and the method of constructing the calculated grid, the optimal parameters of the model were determined, which allowed to make changes in the battery design. The adequacy of the simulation is confirmed by the results of laboratory tests of the battery with a modified design.

В батареях высокой емкости, состоящих из множества литий-ионных ячеек, они находятся в заведомо отличных друг от друга температурных условиях. При отсутствии принудительного охлаждения центральные ячейки нагреваются значительно сильнее крайних [1, 2], что связано с взаимным влиянием соседних элементов друг на друга. В случае использования воздушного или жидкостного принудительного охлаждения дополнительное влияние оказывает неравномерности распределения теплоносителя по отдельным ячейкам [3, 4].

В рамках данного проекта разрабатывается автономный седельный тягач с системой предиктивного управления [5]. Как показывает проведенный обзор [6] предиктивное управление является одним из самых эффективных методов управления силовыми установками, а значительное количество современных исследований посвящено гибридным транспортным средствам, так как проблема грамотного распределения потоков мощности в них стоит особенно остро. Моделирование работы разрабатываемого транспортного средства с последовательной схемой гибридной энергоустановки [7, 8] позволило определить необходимую суммарную емкость батарей около 20 кВт*ч. При

разработке литий-ионных батарей большой емкости, состоящих из множества отдельных ячеек, одной из важнейших проблем является обеспечение равномерности и достаточности их охлаждения.

При чрезмерном нагреве единственной ячейки аккумулятора может произойти ее выход из строя вследствие теплового разгона, что чрезвычайно опасно для всей батареи в целом. Контролировать температурное состояние каждой ячейки или даже ее отдельных частей, как это происходит при лабораторных испытаниях, в большой батарее на практике технически недостижимо. Поэтому важно теоретическое исследование и моделирование систем охлаждения литий-ионных батарей.

Разработанная батарея предназначена для седельного тягача с гибридной энергоустановкой. Она состоит из 42 литий-ионных ячеек типа NMC. Все ячейки электрически соединены по последовательной схеме, а в конструкции разрабатываемого седельного тягача предусмотрены три таких аккумуляторных модуля.

Электрические разъемы всех ячеек соединяются с помощью единой плиты, выполненной из изолирующего материала, и специальных прижимов. Корпус модуля состоит из металлической рамы и двух пластиковых коробов – внешнего защитного и внутреннего направляющего потоки воздуха. Воздух для охлаждения ячеек подается радиальным вентилятором в полость, образованную пластиковыми оболочками, откуда он попадает в промежутки между ячейками. Воздух проходит вдоль ячеек снизу вверх и отбирает выделяемую в процессе зарядки или разрядки тепловую энергию. Нагретый теплоноситель удаляется из модуля в окружающую среду. Конструкция разработанного аккумуляторного модуля и схема его системы охлаждения показаны на рисунке 1.

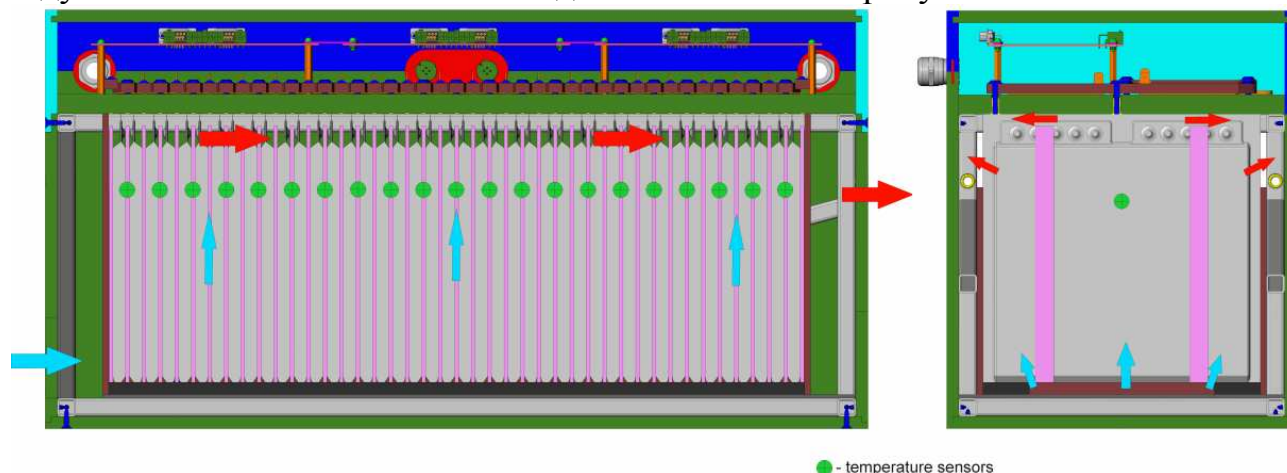


Рис. 1. Конструкция аккумуляторного модуля и схема охлаждения

В верхней части аккумуляторного модуля расположены платы battery management system (BMS), контролирующие напряжения и температуры отдельных ячеек. Количество датчиков температуры в два раза меньше количества ячеек, но их равномерное распределение и положение в наиболее нагреваемой зоне позволяют эффективно контролировать температуру. На рисунке 2 показан внешний вид аккумуляторного модуля без верхней крышки.

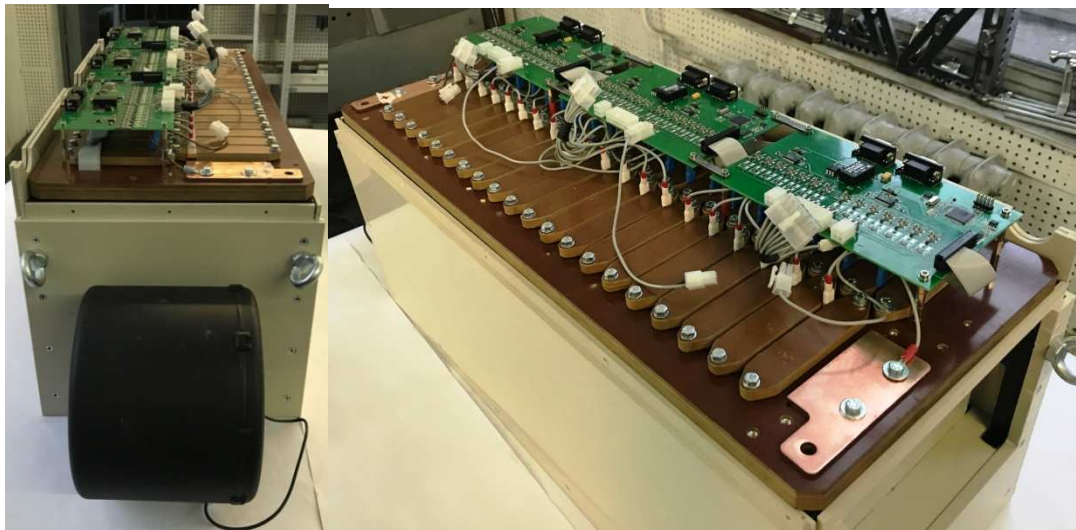


Рис. 2. Внешний вид аккумуляторного модуля без верхней крышки

Для проверки работоспособности разработанного аккумуляторного модуля были проведены лабораторные испытания, заключающиеся в последовательном разряде различными токами, при которых контролировалось, в том числе, и показания датчиков температуры ячеек. Токи разрядки составляли от 1С (40А) до 5С (200А), а время испытаний от 1 часа до 10 минут. Максимального нагрева батареи удалось достигнуть при токе разрядки 200А, что фактически является чрезмерно жестким тестом, так как подобные режимы работы маловероятны при эксплуатации в составе транспортного средства.

В результате испытаний было определено, что хотя среднее полученное значение температуры воздуха между ячейками составило не более 37°C, ее максимальное значение для трех отдельных датчиков достигло 54°C (рисунок 3). Отсюда можно сделать вывод о работе нескольких ячеек по верхней границе температурного диапазона. Измеренная в ходе испытаний величина расхода воздуха составляла около 160 м³/ч на протяжении всего цикла нагрузки при температуре окружающей среды около 20°C.

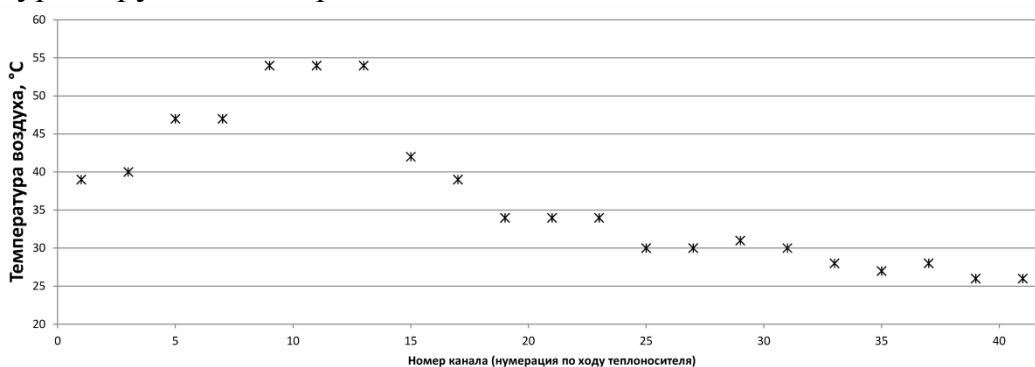


Рис. 3. Экспериментально полученное распределение температуры воздуха в каналах между ячейками аккумуляторной батареи

Для моделирования процессов тепло- и массопереноса был использован метод конечных элементов, а в качестве граничных условий принимались результаты измерений параметров воздуха зафиксированные в процессе лабораторных испытаний. В общем случае, точность моделирования повышается при уменьшении размеров конечных элементов, но данная зависимость является

нелинейной, что дополнительно осложняет выбор оптимальных характеристик сетки. Наилучшего соотношения между точностью моделирования и ресурсоемкостью расчетов можно добиться введением локальных расчетных сеток. При этом узкие каналы (ширина 3 мм), в которых протекает теплоноситель, дробятся значительно сильнее основной сетки, что позволяет акцентировать внимание на значимых параметрах без чрезмерного количества конечных элементов.

В первой серии моделирования были использованы размеры основной сетки от 100 до 10 мм (с шагом 10 мм) и уровни дополнительного дробления каналов от 1 до 3. На рисунке 4 представлены полученные зависимости максимальной температуры воздуха в каналах между электрохимическими ячейками от размера основной сетки и общего количества конечных элементов в расчетной сетке.

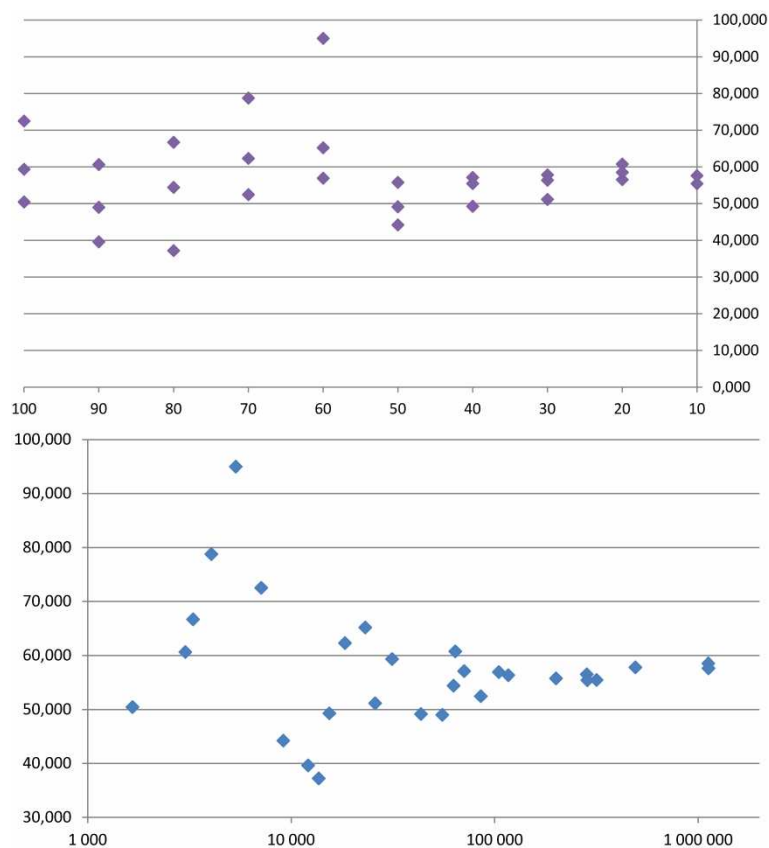


Рис. 4. Зависимости максимальной температуры воздуха в каналах между электрохимическими ячейками от размера основной сетки и общего количества конечных элементов в расчетной сетке

Как видно из представленных графиков, по мере уменьшения размера конечных элементов базовой сетки точность моделирования значительно повышается, расчетное значение максимальной температуры воздуха приближается к результатам лабораторных исследований. Также стоит отметить снижение влияния уровня дробления локальной сетки в узких каналах между ячейками, что происходит вследствие приближения размера конечных элементов основной сетки к ширине каналов. При этом значительно меняется поле распределения температур и скоростей, полученное в результате расчетов. При низком разрешении расчетной сетки распределение температур и скоростей

воздуха явно не имеет ничего общего с экспериментально полученными данными. В качестве примеров, на рисунке 5 представлены распределения температур и скоростей, полученные при общем количестве ячеек в расчетной сетке около 1,5 тыс. и более 1,1 млн.

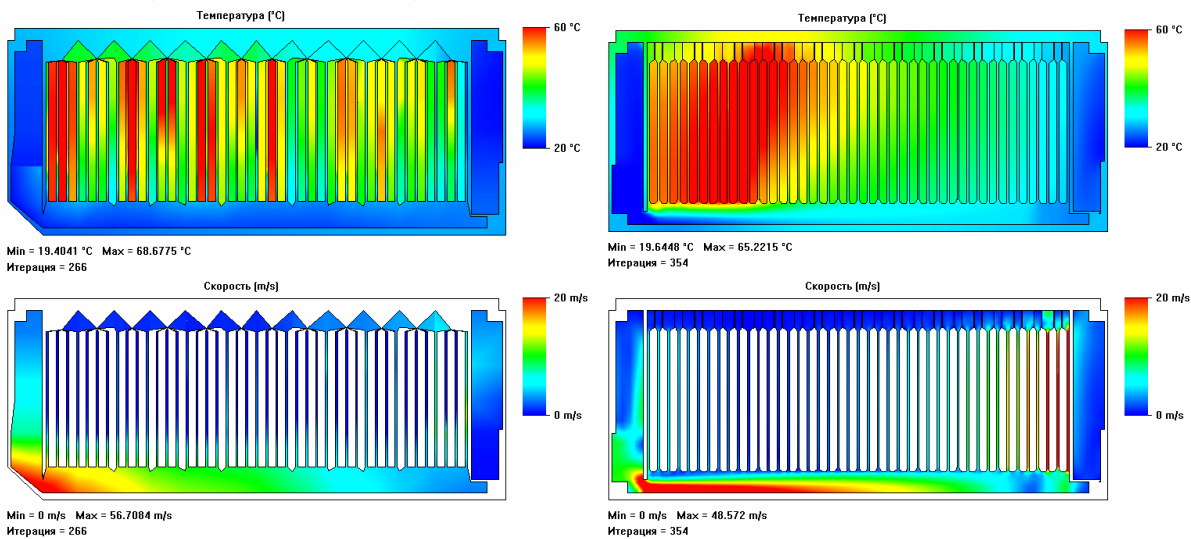


Рис. 5. Расчетные распределения температур и скоростей при различных уровнях дробления сетки: слева - около 1,5 тыс. ячеек в расчетной сетке; справа - более 1,1 млн. ячеек в расчетной сетке

Для определения причин перегрева отдельных ячеек требуется значительно повысить точность моделирования теплообмена в узких каналах между ячейками, что было реализовано в следующей серии расчетов. Диапазон изменения размеров основной сетки составил от 10 до 5 мм с шагом 1 мм, а уровни дополнительного дробления каналов от 0 (локальная сетка не используется) до 2. Всего было проведено 42 отдельных расчета с различными параметрами сетки, причем количество конечных элементов изменялось от десятков тысяч до 5 миллионов. На рисунке 6 показан график изменения количества конечных элементов в расчетной сетке модели во второй серии расчетов.

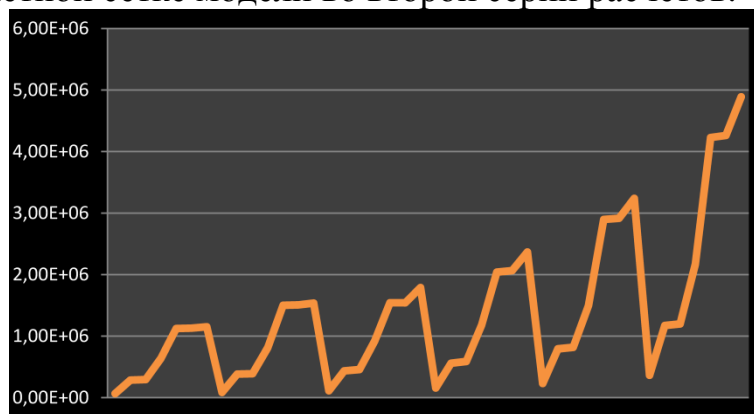


Рис. 6. Изменение количества конечных элементов в расчетной сетке модели во второй серии расчетов

На рисунке 7 показана зависимость расчетной максимальной температуры воздуха в каналах между аккумуляторными ячейками от количества конечных элементов сетки. Наиболее полного совпадения с экспериментальными данными

удалось добиться при размере основной сетки 5 мм и общем количестве ячеек около 5 миллионов.

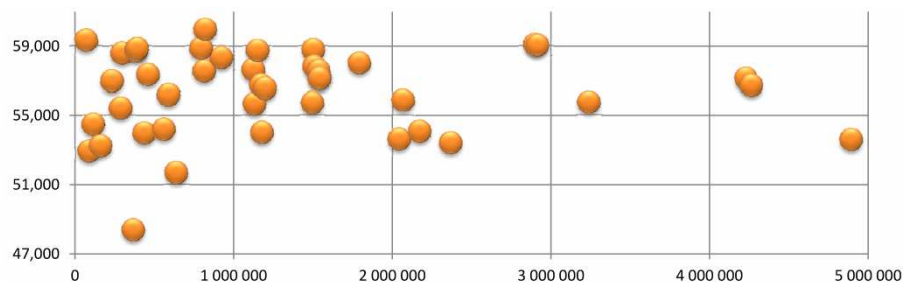


Рис. 7. Зависимость расчетной максимальной температуры воздуха в каналах между аккумуляторными ячейками от количества конечных элементов сетки во второй серии расчетов

Распределения температуры и скоростей в продольном сечении аккумуляторной батареи (рисунок 8) позволили выявить причины неравномерного распределения теплоносителя по каналам и возникающего перегрева отдельных ячеек.

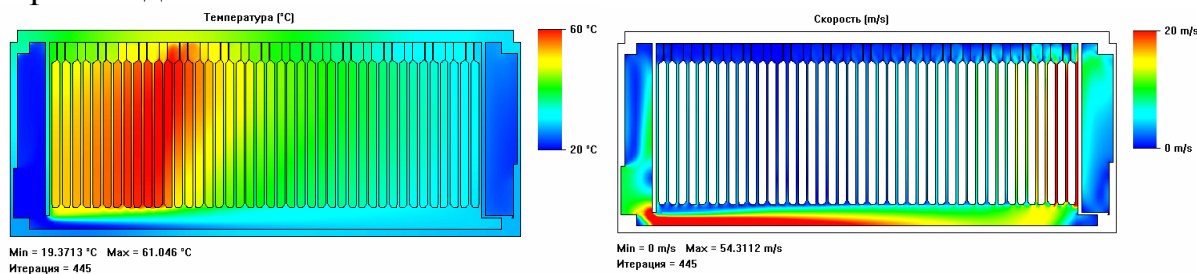


Рис. 8. Полученные распределения температуры и скоростей в продольном сечении аккумуляторной батареи

После анализа результатов моделирования в конструкцию аккумуляторного модуля были внесены ряд изменений, направленных на оптимизацию системы принудительного воздушного охлаждения. Это позволило снизить максимальную температуру ячеек до 40°C (рисунок 9). Для наглядного сравнения результатов доработки конструкции на рисунка 8 и 9 использована единая цветовая шкала температур.

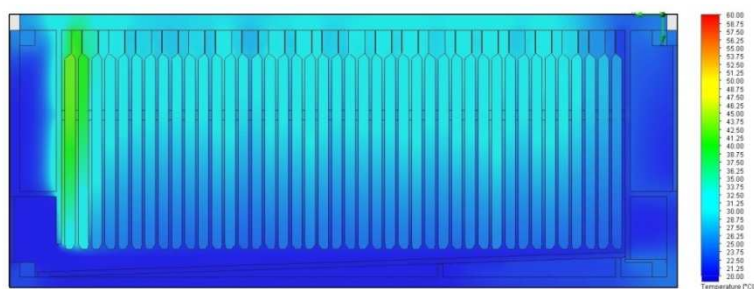


Рис. 9. Распределение температуры в продольном сечении аккумуляторного модуля измененной конструкции

Настоящая работа подготовлена в рамках соглашения № 14.577.21.0249 от 26 сентября 2017 года о предоставлении субсидии при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

(Уникальный идентификатор прикладных научных исследований RFMEFI57717X0249).

Список литературы

1. T. Maruvada, L. Patidar and M. Patel, "Thermal characterization of lithium polymer battery module for electric vehicle application", *Appl. Mech. Mater.*, vol. 575, pp. 620-623, Jun 2014, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.575.620.
2. Z. Wang, W. Fan and P. Liu, "Simulation of temperature field of lithium battery pack based on computational fluid dynamics", *Energy Procedia*, vol. 105, no. 1052017, pp. 3339-3344, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.764.
3. Y. Chen and J. Evans, "Heat transfer phenomena in lithium/polymer-electrolyte batteries for electric vehicle application", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 140, no. 7, pp. 1833-1837, Mar. 1993, doi: 10.1149/1.2220724.
4. G. Karimi and A. Dehghan, "Thermal management analysis of a lithium-ion battery pack using flow network approach", *Int. J. Mech. Eng. Mechatron.*, vol. 1, no. 1, pp. 88-94, Jan. 2012, doi: 10.11159/ijmem.2012.011.
5. L.Yu. Lezhnev, V.S. Korotkov, D.A Petrichenko. and B.A Papkin, "Autonomous hybrid tractor unit with a predictive control system", *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Develop.*, vol. 9(3), pp. 1069-1076, Jun. 2019, doi: 10.24247/ijmperdjun2019114.
6. V.S. Korotkov, V.A. Neverov, B.A. Papkin and A.P Tatarnikov, "Predictive driving: the state-of-art and development trends", *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 9(7), pp. 1367-1375, Jul. 2018. Accessed: Jul. 2019 [Online]. Available: <http://www.iaeme.com/ijmet/issues.asp?JType=IJMET&VType=9&IType=7>.
7. I.A. Kulikov, L.Y. Lezhnev and S.V. Bakhmutov, "Comparative study of hybrid vehicle powertrains with respect to energy efficiency", *J. Mach. Manuf. Rel.*, vol. 48(1), pp. 11-19, Apr. 2019, doi: 10.3103/S1052618819010102.
8. L.Yu. Lezhnev, N.A. Khripach, D.A. Petrichenko and F.A. Shustrov, "Predictive control implementation for series hybrid electric vehicles", *Int.l J. Civil Eng. Technol.*, vol. 8(11), pp. 1107-1116, Nov. 2017, Accessed: Jul. 2019 [Online]. Available: <http://http://www.iaeme.com/ijciет/issues.asp?JType=IJCIET&VType=8&IType=11>.

Сведения об авторах:

Хрипач Николай Анатольевич – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Наземные транспортные средства», Московский политех, г.Москва;

Коротков Виктор Сергеевич – ведущий инженер НТЦ «Силовые агрегаты», Московский политех, г.Москва;

Шустров Федор Андреевич – заместитель начальника НТЦ «Силовые агрегаты», Московский политех, г.Москва.