

УДК 621.311.61

## Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения

Т. И. Петров\*, А. Р. Сафин, Е. И. Грачева, И. В. Ившин, А. Н. Цветков, В. Р. Басенко

\*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;

e-mail: [tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

### Информация о статье Реферат

Поступила  
в редакцию  
01.09.2022;

получена  
после доработки  
11.10.2022

### Ключевые слова:

мобильная зарядная установка для электротранспорта, аккумуляторные батареи, литий-ионные элементы, зарядные станции, моделирование COMSOL

### Для цитирования

Развитие электрического транспорта неразрывно связано с модернизацией сопутствующей инфраструктуры, и одним из факторов медленного внедрения электротранспорта в России является малое количество зарядных станций. У большинства существующих решений в области зарядных станций есть недостаток – отсутствие мобильных установок. Коллективом КГЭУ и ПО "Зарница" разрабатывается мобильная зарядная установка для заряда электротранспорта (МУЗЭ). На этапе проектирования возникла проблема с тем, что проводить постоянные испытания на полноценном прототипе мобильной установки заряда электротранспорта (МУЗЭ) будет затруднительно из-за массогабаритных параметров оборудования. При этом существует необходимость в предварительном подтверждении соответствия МУЗЭ группам климатического (УХЛ1) и механического исполнения (М3). Для выполнения данной задачи было принято решение о моделировании работы МУЗЭ в ПО COMSOL: необходимо смоделировать модуль из четырех аккумуляторных батарей (АКБ) с целью подтвердить параметры производителя, и таким образом верифицировать полученную модель. На этой основе можно реализовать полную модель МУЗЭ, состоящую из 1 200 АКБ, которую используют для проверки соответствия заданным условиям. Для тепловых расчетов необходимо проверить заранее выбранные параметры мощности кондиционирования и выбрать толщину теплоизоляции. В результате исследований получена 3D-модель в COMSOL, определены параметры всех используемых материалов, построены связи решений, выбрана физика процессов и вид решателя. На основе моделирования выбрана толщина изоляции, получены результаты моделирования работы системы кондиционирования для поддержания рабочей температуры аккумуляторных батарей, и продемонстрированы результаты, которые подтверждают механическую надежность МУЗЭ.

Петров Т. И. и др. Моделирование работы оборудования мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта с целью подтверждения соответствия группам климатического и механического исполнения. Вестник МГТУ. 2022. Т. 25, № 4. С. 365–377. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377>.

## Simulation of operating the equipment of mobile charging installation for charging electric vehicles to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups

Timur I. Petrov\*, Alfred R. Safin, Elena I. Gracheva, Igor V. Ivshin, Alexey N. Tsvetkov, Vasilii R. Basenko

\*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;

e-mail: [tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

### Article info

Received 01.09.2022;  
received  
in revised form  
11.10.2022

### Key words:

mobile charging station for electric vehicles, storage batteries, lithium-ion cells, charging stations, COMSOL simulation

### Abstract

The development of electric transport is inextricably linked with the modernization of the associated infrastructure, and one of the factors for the slow introduction of electric transport in Russia is the small number of charging stations. But most of the existing solutions in the field of charging stations have a drawback – the lack of mobile installations. The team of Kazan State Power Engineering University (KSPEU) and Production Association "Zarnitsa" is developing a mobile electric vehicle charge units (MSCEU). At the design stage, a problem has arisen with the fact that it would be difficult to conduct constant tests on a full-fledged prototype of the MSCEU due to the weight and size parameters of the equipment. At the same time, there is a need for preliminary confirmation of the compliance of the MSCEU with the climatic (UHL1) and mechanical performance (M3) groups. To accomplish this task, it was decided to simulate the work of the MSCEU in the COMSOL software. For solving this problem, it is necessary to simulate a module of four rechargeable batteries in order to confirm the manufacturer's parameters, and thus verify the resulting model. Based on these results, a complete MSCEU model consisting of 1,200 batteries can be implemented, which can be used to check compliance with the given conditions. For thermal calculations, it is necessary to check the pre-selected parameters of the air conditioning power, and to select the thickness of the thermal insulation. As a result a 3D model has been implemented in COMSOL, the parameters of all materials used have been determined, the connections of solutions have been built, physics of processes and the type of a solver have been selected. Based on the simulation, the insulation thickness has been chosen, the results of simulation of operating the air conditioning system to maintain the operating temperature of the batteries have been obtained, and the results have been demonstrated that confirm the mechanical reliability of the MSCEU.

### For citation

Petrov, T. I. et al. 2022. Simulation of operating the equipment of mobile charging installation for charging electric vehicles to confirm compliance with climatic and mechanical performance groups. *Vestnik of MSTU*, 25(4), pp. 365–377. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-4-365-377>.

## Введение

Использование электромобилей растет быстрыми темпами. В 2018 г. в мире продано более двух миллионов машин такого типа, прогноз на 2025 г. составляет 10 миллионов электромобилей. Ожидается, что к 2040 г. 57 % всех продаж легковых автомобилей и более 30 % мирового парка легковых автомобилей будут составлять электромобили (Сафин и др., 2021а; Cui et al., 2018б). Мировой спрос на энергию для электромобилей также может вырасти с 20 млрд кВт·ч в 2020 г. до 280 млрд кВт·ч в 2030 г. (Сафин и др., 2021б; Sousa et al., 2018).

В то время как внедрение электромобилей ускоряется беспрецедентным образом, отсутствие инфраструктуры для их зарядки препятствует развитию данного рынка. Для компенсации этих недостатков заметную роль в ускорении проникновения электромобилей могли бы сыграть мобильные зарядные станции, способные предоставлять услуги зарядки без ограничений по месту и времени процесса зарядки (Cui et al., 2018а).

Проводятся многочисленные исследования, направленные на разработку безопасных и долговечных аккумуляторов с более высокой мощностью и удельной энергией (Shao et al., 2017; Li et al., 2010). Эволюция систем хранения энергии привела к разработке литий-ионных аккумуляторов. В настоящее время литий-ионные аккумуляторы стали доминирующей технологией, особенно на рынке электромобилей благодаря высокой удельной энергии и мощности, длительному жизненному циклу и отсутствию эффекта памяти (Gracheva et al., 2019).

Как правило, литий-ионные аккумуляторы соединяются последовательно и/или параллельно для создания системы накопления энергии с желаемым напряжением и емкостью. Во время работы сборка многих ячеек в одном отсеке вызывает повышение температуры, что приводит к локальному износу или даже к взрыву, если не принять меры (Dong et al., 2015; Kostyukov et al., 2010). Литий-ионные аккумуляторы для безопасного использования имеют оптимальный рабочий диапазон температур от 0 до 35 °С (Li et al., 2018; Bei et al., 2019). Следовательно, система кондиционирования необходима для отвода избыточного тепла и обеспечения равномерного распределения температуры внутри мобильной зарядной установки для заряда электротранспорта (МУЗЭ). Литий-ионные аккумуляторы чувствительны к высоким и низким температурам. Таким образом, управление тепловым режимом необходимо для поддержания температуры ячеек системы накопления энергии в оптимальном рабочем диапазоне и обеспечения безопасного и эффективного использования (Aranovski et al., 2017).

В Казанском государственном энергетическом университете (КГЭУ) и производственном объединении "Зарница" разрабатывается мобильная зарядная установка для заряда электротранспорта (МУЗЭ).

В статье рассматривается влияние внешних воздействующих факторов (ВВФ) на электрические характеристики и механические свойства аккумуляторов. Только в нескольких недавних исследованиях изучалось влияние вибраций на деградацию и усталость материалов аккумуляторных элементов, а также влияние вибраций на структуру аккумуляторной батареи (Zhang et al., 2018). Несмотря на то что влияние динамических нагрузок и случайных вибраций на механическое поведение конструкций батарейных элементов было исследовано и определена корреляция между вибрацией и электрическими характеристиками элемента батареи для поддержки разработки более надежных электрических систем, необходимо уточнить процессы механической деградации, влияющие на электрические характеристики и безопасность аккумуляторных элементов.

## Материалы и методы

*Объект моделирования – мобильная зарядная установка для заряда электротранспорта*

Разрабатываемая МУЗЭ выполняется в контейнерном исполнении со следующими габаритами (внешние): длина – 12,192 м, ширина – 2,438 м, высота – 2,591 м. Для возможности эксплуатации МУЗЭ в соответствии с группой климатического исполнения УХЛ1 по ГОСТ 15150-69<sup>1</sup> предусмотрена теплоизоляция корпуса контейнера материалом LOGICPIR.

Аккумуляторные батареи устанавливаются на открытые стеллажи для лучшего охлаждения и удобства технического обслуживания и ремонта. Батареи собираются в модули из 4 аккумуляторных элементов общей массой 20 кг, что позволяет двум работникам монтировать модули на стеллажи без дополнительных механических приспособлений.

В состав МУЗЭ входят следующие основные блоки:

- контейнер;
- станция управления МУЗЭ;
- блок накопителей электроэнергии;
- устройство инверторное;
- устройство индукционное зарядное.

<sup>1</sup> ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М., 2010.

На рис. 1 изображен внешний вид МУЗЭ. Внешне МУЗЭ представляет собой контейнер, который возможно транспортировать всеми видами транспорта, включая автомобильный.

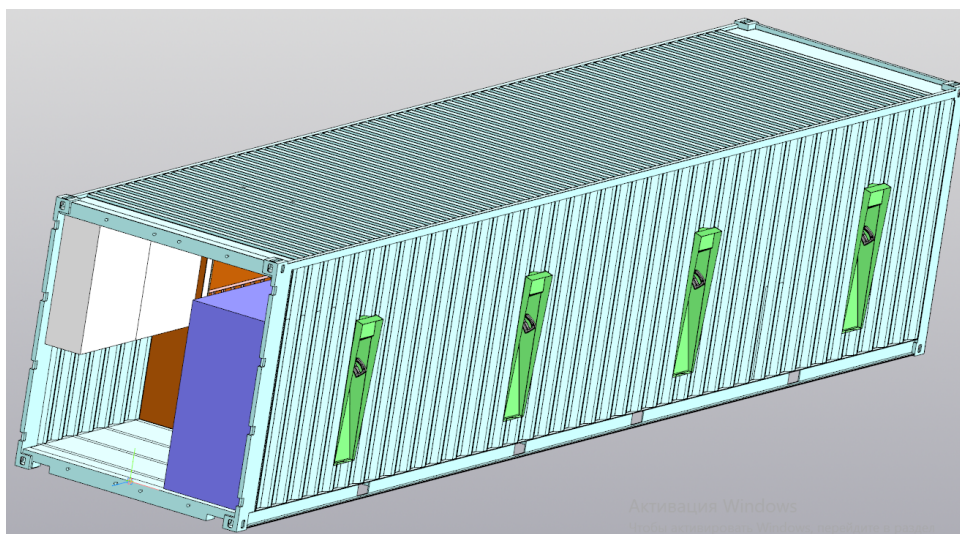


Рис. 1. Внешний вид МУЗЭ  
Fig. 1. External view of a module MCSEU

МУЗЭ оборудована коннекторами:

- Type 2 для зарядки переменным током;
- CHAdеMO для зарядки постоянным током;
- комбинированным коннектором CCS;

– платформой индукционной, предназначенной для передачи энергии переменного электромагнитного поля принимающему устройству, расположенному на электротранспорте, при бесконтактном способе зарядки.

Аккумуляторные батареи собираются в сборки по 4 шт., а сборки аккумуляторов – в зарядные модули по 240 шт.

С целью предотвращения пожара при нештатных ситуациях в составе МУЗЭ предлагается использовать модуль пожаротушения Заря 22 Л. Для нормализации рабочей температуры внутри контейнера применена система климат-контроля.

Для подключения к сети среднего напряжения используется силовой трехфазный трансформатор.

## Результаты и обсуждение

### *Соответствие группе климатического исполнения*

Управление температурным режимом аккумуляторов важно из-за высокого содержания энергии и риска быстрого повышения температуры в диапазоне больших токов (*Meng et al., 2018*). Надежная и безопасная работа этих аккумуляторов находится под серьезной угрозой из-за температур, выходящих за диапазон рабочих температур. Необходимо иметь простую, но точную модель для оценки теплового поведения аккумуляторов в различных условиях эксплуатации, а также возможность прогнозировать внутреннюю температуру контейнера.

Для достижения этой цели разработана модель с целью исследования эволюции распределения температуры в литий-железо-фосфатных элементах. Предполагается, что выделение тепла внутри батареи происходит равномерно (*Han et al., 2019; Saqli et al., 2020*). Теплообмен от поверхностей батареи с окружающей средой неравномерен, т. е. зависит от температуры конкретной точки на поверхности ячейки. Кроме того, модель адаптирована для реализации в системах управления батареями. Эту модель можно использовать для масштабирования аккумуляторов и аккумуляторных батарей большого размера.

Успешная конструкция батарейных блоков начинается с правильного подбора тепловых свойств батареи.

Использование материалов с высокой термостойкостью, таких как связующие в электродах и полимерных сепараторах, неизбежно при создании высокопроизводительных аккумуляторов, но это ограничивает теплопередачу внутри элементов (*Neupane et al., 2018*). Однако температуры, выходящие за диапазон рабочих значений, не допускаются по соображениям безопасности и надежности; они могут ускорить деградацию батареи и даже привести к тепловому разгону (*Zhao et al., 2018; Munoz et al., 2020*). Для такой системы требуется эффективная тепловая модель с ограниченным числом измеряемых параметров в каждом состоянии (*Patil et al., 2020; Liu et al., 2019*).

В этом исследовании используются АКБ LiFePO<sub>4</sub> LF280K высокой мощности емкостью 280 А·ч.

Согласно ГОСТ 15150-69<sup>2</sup> по УХЛ1 рабочая температура составляет от  $-60^{\circ}$  до  $+40^{\circ}$ , а рабочая температура LF280K –  $0-35^{\circ}$ , поэтому сформулируем задачи теплового расчета:

– смоделировать отдельный модуль, состоящий из 4 АКБ, с целью получения графика изменения температуры АКБ при процессе заряда. В результате получить модель модуля, которую можно будет масштабировать для теплового расчета всего блока;

– смоделировать блок с целью получения графика изменения температуры при процессе заряда АКБ и средней температуры воздуха в блоке. В результате выбрать толщину утеплителя, подтвердить предварительно выбранную мощность нагревателей и температуру, которую необходимо поддерживать для охлаждения.

1. Моделирование отдельного модуля, состоящего из 4 АКБ, с целью получения графика изменения температуры АКБ при процессе заряда

Для проведения теплового анализа в программном пакете COMSOL создана геометрическая 3D модель модуля, изображенная на рис. 2.

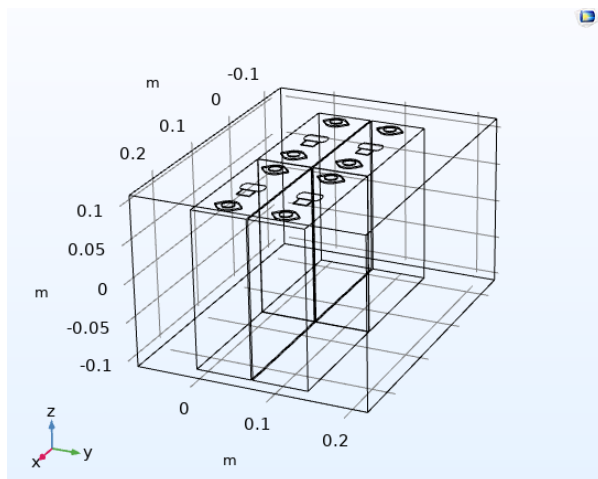


Рис. 2. Расчетная геометрическая модель модуля  
Fig. 2. Calculation geometric model of the module

Для проведения теплового анализа создана физическая модель в программном пакете COMSOL. Создание физической модели начинается наполнением геометрической модели материалами, которые имеют свойства, отражающие тепловые характеристики.

Основные материалы для проведения теплового анализа выбраны в виде готовых наборов параметров из библиотеки COMSOL: Air, Active Battery Material. Далее для проведения моделирования необходимо задать все параметры АКБ, приведенные на рис. 3.

Name	Expression	Value	Description
C_rate	0.5	0.5	C rate
Q_cell	280[A*h]	1.008E6 C	Battery cell capacity
I_1C	Q_cell/1[h]	280 A	1C current
kT_batt_ang	30[W/m/K]	30 W/(m·K)	Thermal conductivity, in...
kT_batt_r	1[W/m/K]	1 W/(m·K)	Thermal conductivity, cro...
Ea_eta1C	24[kJ/mol]	24000 J/mol	Activation energy
Ea_J0	-59[kJ/mol]	-59000 J/mol	Activation energy
Ea_Tau	24[kJ/mol]	24000 J/mol	Activation energy
T0	35[degC]	308.15 K	Reference temperature
J0_0	0.5	0.5	J0 at reference temperat...
tau_0	1000[s]	1000 s	tau at reference tempera...
eta_1C	4.5[mV]	0.0045 V	eta_1C at reference temp...
rho_batt	2000[kg/m^3]	2000 kg/m <sup>3</sup>	Battery density
Cp_batt	1400[J/(kg*K)]	1400 J/(kg·K)	Battery heat capacity
ht	30[W/m^2/K]	30 W/(m <sup>2</sup> ·K)	Heat transfer coefficient
T_init	25[degC]	298.15 K	Initial/external temperat...

Рис. 3. Параметры моделируемого АКБ LF280K, представленные в окне ПО COMSOL  
Fig. 3. Parameters of the simulated battery LF280K presented in the COMSOL software window

<sup>2</sup> ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М., 2010.

Физика процессов задавалась блоком Lumped Battery, который включал в себя блок Cell Equilibrium Potential и блок Voltage Losses.

После создания физической модели на смоделированную модель была наложена сетка для проведения конечно-элементного моделирования. Максимальный размер элемента сетки – 0,04 м, минимальный – 0,0072 м, максимальный рост элемента сетки задан коэффициентом 1,5, а коэффициент кривизны равен 0,6.

В результате проведения расчета получены данные об изменении напряжения АКБ при процессе заряда (график приведен на рис. 4) и изменение температуры самой АКБ (график приведен на рис. 5).

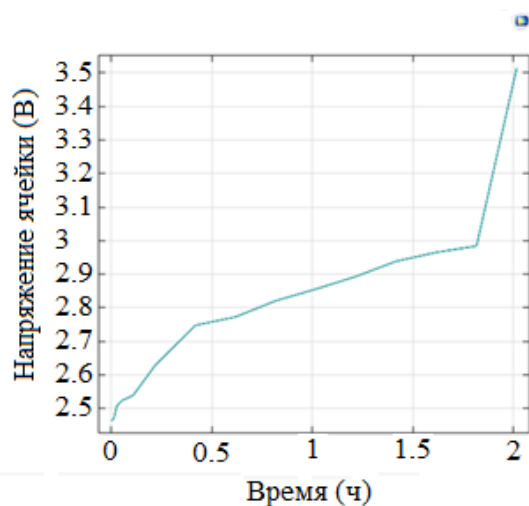


Рис. 4. График изменения напряжения АКБ при заряде

Fig. 4. Graph of battery voltage during charging

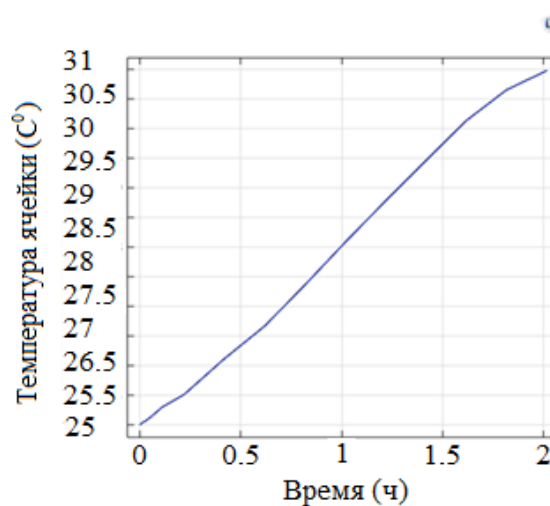


Рис. 5. График изменения температуры АКБ при заряде

Fig. 5. Graph of battery temperature during charging

Таким образом, получена модель модуля, которую можно масштабировать для теплового расчета всего блока.

## 2. Моделирование блока с целью получения графика изменения температуры при процессе заряда АКБ и средней температуры воздуха в блоке

Для проведения теплового анализа в программном пакете COMSOL создана геометрическая 3D модель МУЗЭ.

Основными материалами для проведения теплового анализа полного блока выбраны: воздух – воздушное пространство в блоке (аналогичный блоку в ПО COMSOL – Air), материал АКБ – аккумуляторы, клеммы (Active Battery Material), полипропилен – теплоизоляция (Polypropylene), сталь – материал контейнера (Structural steel).

После создания физической модели на смоделированную модель была наложена сетка для проведения конечно-элементного моделирования. Максимальный размер элемента сетки – 1,42 м, минимальный – 0,265 м, максимальный рост элемента сетки задан коэффициентом 1,5, а коэффициент кривизны равен 0,7.

Исходя из соображений эксплуатации и анализа результатов, полученных в ПО COMSOL (скриншоты программы представлены на рис. 6) в ходе моделирования, сделаны выводы, что для поддержания температуры хранения (не эксплуатации) АКБ достаточно использование утеплителя толщиной 100 мм. При 200 мм средняя температура блока выше, однако реализация такого решения экономически не обоснована (стандартный метод нанесения пенополиуретаном 100–150 мм) и технологически сложнее (теплоизоляция будет наноситься снаружи).

Если анализировать значения, связанные с температурой АКБ, то можно сделать вывод, что диапазон рабочих температур не соблюдается, и необходимо реализовать отопление. Предварительно, на этапе проектирования, была выбрана система кондиционирования мощностью 20 кВт. В ПО COMSOL отопление моделируется добавлением блока Heat Source (20 кВт).

Получены результаты изменения температуры (график представлен на рис. 7) при работе отопления для самого критического случая (при внешней температуре  $t_{\text{внеш}} = -60^\circ$  и внутренней начальной температуре блока  $t_{\text{блока нач}} = 0^\circ$ ).

Таким образом, на основе рис. 7 можно сделать вывод, что работа МУЗЭ без отопления невозможна, так как средняя температура в блоке становится меньше  $0^\circ$  уже после 3 часов работы, следовательно, нормальная эксплуатация АКБ будет нарушена. При этом мощность системы отопления в 20 кВт достаточна, так как полученное значение поддерживаемой температуры  $10^\circ$  соответствует рабочему диапазону АКБ.

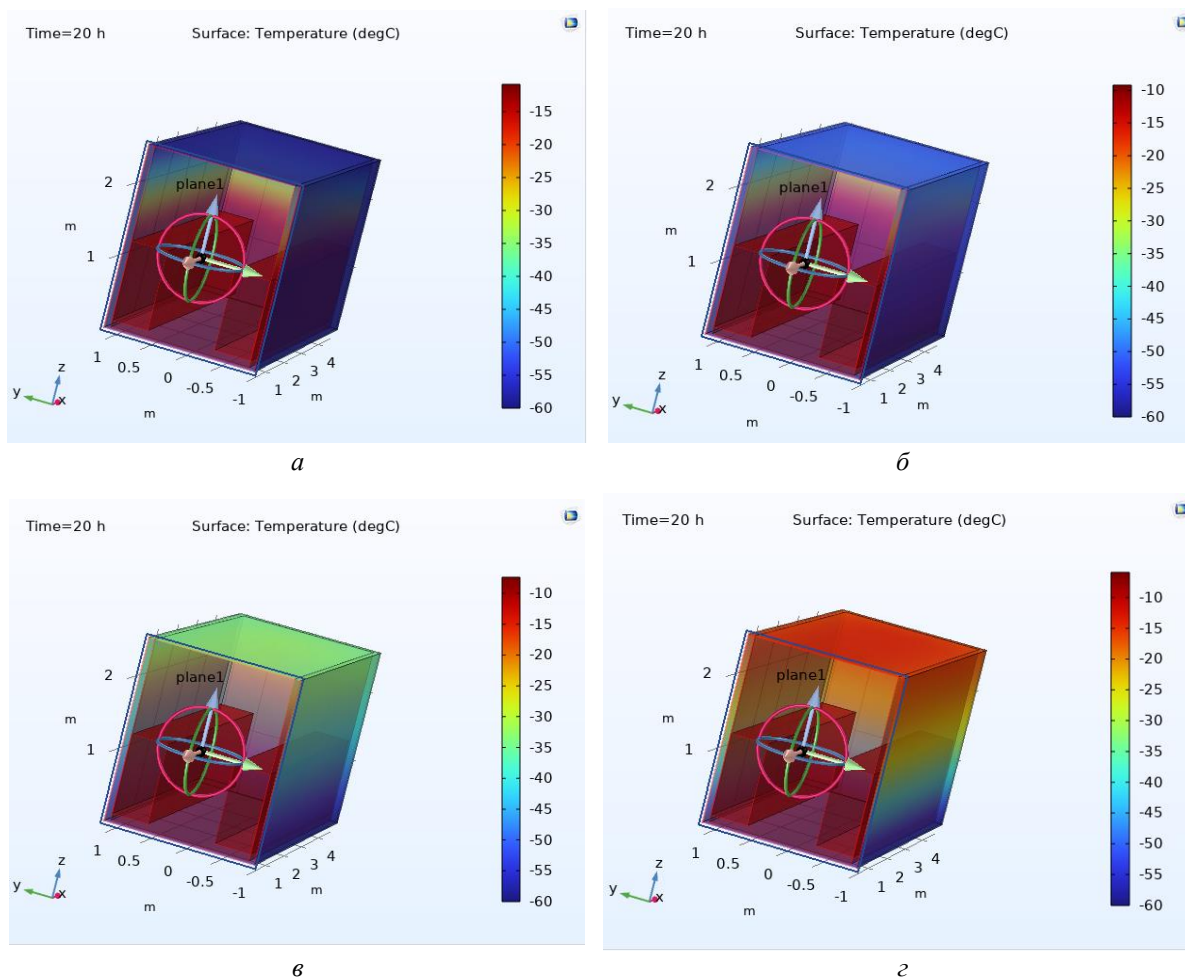


Рис. 6. Распределение температуры внутри блока через 20 ч при  $t_{\text{внеш}} = -60^\circ$  и начальной  $t_{\text{блока}} = 20^\circ$ :  
 а – без утеплителя; б – утеплитель 50 мм; в – утеплитель 100 мм; г – утеплитель 200 мм  
 Fig. 6. Temperature distribution inside the block after 20 hours with  $t_{\text{ext}} = -60^\circ$  and initial  $t_{\text{block}} = 20^\circ$ :  
 а – without insulation; б – insulation 50 mm; в – insulation 100 mm; г – insulation 200 mm

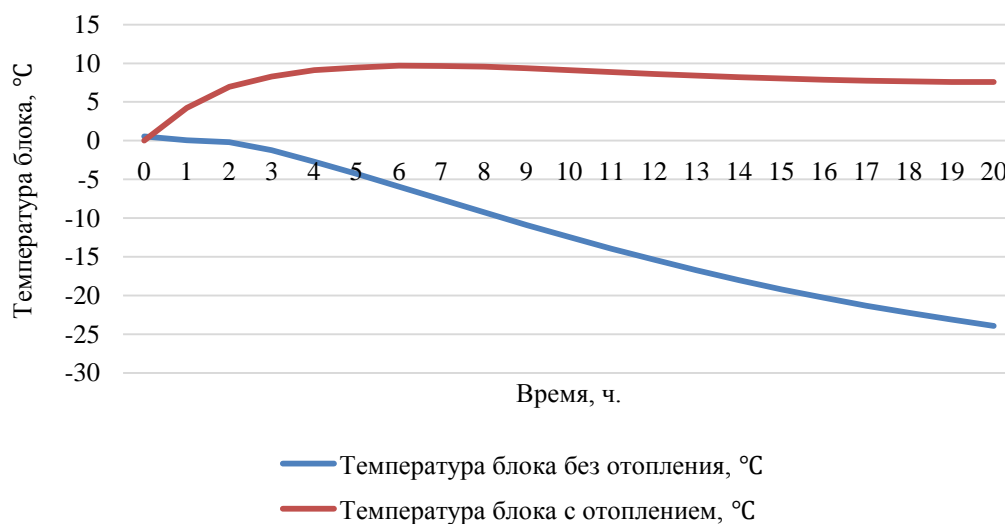


Рис. 7. Зависимость средней температуры блока от времени при наличии и отсутствии отопления  
 ( $t_{\text{внеш}} = -60^\circ$ ,  $t_{\text{блока нач}} = 0^\circ$ )  
 Fig. 7. The dependence of the average temperature of the block on time in the presence and  
 absence of heating ( $t_{\text{ext}} = -60^\circ$ ,  $t_{\text{block start}} = 0^\circ$ )

Для поддержания диапазона рабочих температур также необходимо реализовать охлаждение. Охлаждение моделируется блоком Temperature (0°). Представлены результаты изменения температуры (график представлен на рис. 8) при работе охлаждения для самого критического случая (при внешней температуре 40° и внутренней 20°).

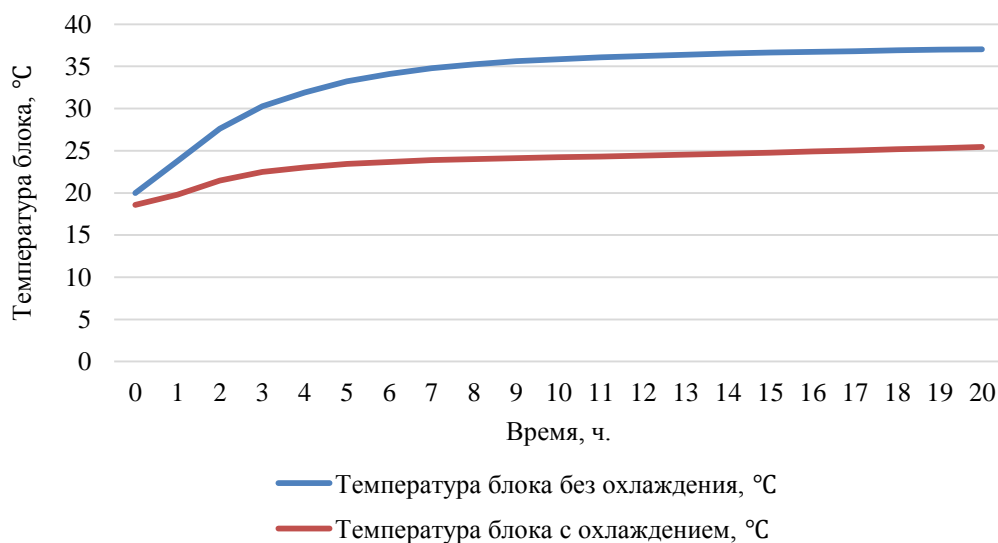


Рис. 8. Зависимость средней температуры блока от времени при наличии и отсутствии охлаждения  
( $t_{\text{внеш}} = 40^\circ$ ,  $t_{\text{блока нач}} = 20^\circ$ )

Fig. 8. The dependence of the average temperature of the block on time with and without cooling  
( $t_{\text{ext}} = 40^\circ$ ,  $t_{\text{block start}} = 20^\circ$ )

Полученные результаты показывают, что при отсутствии охлаждения средняя температура блока превышает значение 35° уже на 7 часу работы МУЗЭ, что выходит за пределы рабочего диапазона АКБ, тогда как аналогичный показатель при использовании системы охлаждения не превышает 25° и свидетельствует об эффективности работы последней.

По результатам проведенного теплового расчета для разрабатываемой МУЗЭ с помощью конечно-элементного моделирования в программном обеспечении COMSOL получены результаты, которые подтверждают возможность поддержания в МУЗЭ рабочей температуры LF280K при внешних температурах, соответствующих группе климатического исполнения УХЛ1 по ГОСТ 15150-69<sup>3</sup>.

#### Прочностные расчеты, подтверждающие работоспособность МУЗЭ

Мобильные установки заряда электротранспорта имеют особенности в перевозочном процессе разными видами транспорта. Учитывая мультимодальность конструкции МУЗЭ, на первый план выходит проблема обеспечения прочности из-за разности действующих нормативных нагрузок на морском, автомобильном и железнодорожном транспорте (Alipoura et al., 2019). На стадии проектирования необходимо уделять большое внимание расчету напряженно-деформированного состояния (НДС) для обеспечения безопасности и сохранности МУЗЭ с одновременным снижением металлоемкости для увеличения конкурентоспособности (Chalise et al., 2018). Все это требует детального исследования поведения МУЗЭ и определения нагрузок, действующих в процессе эксплуатации, с целью совершенствования методики расчета и испытаний.

Развитие численных методов анализа, в первую очередь метода конечных элементов (МКЭ), позволяет получать точные решения для достаточно сложных объектов (Malik et al., 2018). К таким объектам относятся МУЗЭ. Разрабатываемые МУЗЭ будут иметь довольно сложную конструкцию, испытывающую в эксплуатации значительные статические и динамические нагрузки, поэтому их достоверный расчет возможен только с помощью МКЭ, который позволяет проводить многовариантные расчеты с выявлением слабых мест конструкции.

Для решения прочностных задач методом конечных элементов используется программный пакет COMSOL.

<sup>3</sup> ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М., 2010.

Разрабатываемая МУЗЭ относится к группе механического исполнения 3 (М3), для которых согласно ГОСТ-30631-99<sup>4</sup> уровень механических внешних воздействующих факторов имеет следующие границы:

- диапазон частот синусоидальной вибрации находится в пределах от 0,5 до 35 Гц;
- максимальная амплитуда ускорения синусоидальной вибрации – 5 м/с<sup>2</sup>;
- пиковое ударное ускорение для ударов многократного действия – 30 м/с<sup>2</sup>;
- длительность действия для ударного ускорения ударов многократного действия от 2 до 20 мс.

Процесс проведения прочностных расчетов с применением МКЭ в программном обеспечении COMSOL можно разделить на несколько этапов:

- создание геометрической модели объекта;
- создание физической модели объекта;
- наложение конечно-элементной сетки;
- задание внешних связей;
- моделирование нагрузок;
- решение системы уравнений и расчет напряжений в узлах;
- анализ результатов.

После построения геометрическая модель МУЗЭ была разбита на узлы по своим ключевым элементам, а именно:

- 1) контейнер МУЗЭ;
- 2) сухой трансформатор ТСЗ 10/0,4 кВ;
- 3) двунаправленный инвертор;
- 4) блок накопителей электроэнергии.

Далее для проведения прочностного анализа была создана физическая модель в программном пакете COMSOL. Создание физической модели начинается наполнением геометрической модели материалами, которые имеют свойства, отражающие механические характеристики разрабатываемой МУЗЭ.

Для моделирования основных материалов с целью проведения прочностного анализа были выбраны следующие блоки из ПО COMSOL: Structural Steel (параметры представлены в табл. 1), Soft Iron, Copper.

Таблица 1. Параметры материала Structural Steel МУЗЭ  
Table 1. Structural steel material parameters of MCSEU

Параметр	Значение параметра
Плотность	7 850 кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	200·10 <sup>9</sup> Па
Коэффициент Пуассона	0,31

Для трансформатора ТСЗ выбраны материалы магнитопровода и обмоток Soft Iron и Copper, механические параметры которых представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2. Параметры материала Soft Iron  
Table 2. Soft iron material parameters

Параметр	Значение параметра
Плотность	8 300 кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	205·10 <sup>9</sup> Па
Коэффициент Пуассона	0,33

Таблица 3. Параметры материала Copper  
Table 3. Copper material parameters

Параметр	Значение параметра
Плотность	8 960 кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	110·10 <sup>9</sup> Па
Коэффициент Пуассона	0,35

После создания физической модели на смоделированную МУЗЭ была наложена сетка для проведения конечно-элементного моделирования. Максимальный размер элемента сетки – 30 см, минимальный – 3 см, максимальный рост элемента сетки задан коэффициентом 1,5, коэффициент кривизны равен 0,6.

Задача данного исследования будет заключаться в моделировании механических параметров узлов конструкции МУЗЭ под ВВФ. Выбрана физика расчета Solid Mechanics с решением дифференциальных

<sup>4</sup> ГОСТ-30631-99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. М., 1999.



уравнений второго порядка во временной области в режиме Time Dependent. Данный режим рассчитывает уравнения тензора напряжений для МУЗЭ с изменением во времени. Диапазон времени был задан от 2 до 20 мс с шагом 1 мс, что соответствует параметру ГОСТ-30631-99<sup>5</sup>.

Напряженно-деформированное состояние МУЗЭ рассчитывалось с помощью функции тензора напряжений Коши, который описывается дифференциальными уравнениями второго порядка.

Тензор механических напряжений описывает максимальное отклонение точки от положения равновесия, что соответствует физическому понятию виброперемещения. Определив значение виброперемещения, можно оценить значение виброскорости, которое испытывает конструкция МУЗЭ под действием ВВФ, с помощью уравнения

$$a = \frac{du^2}{dt} = -u_{\text{пик}} (\sin \omega t),$$

где  $a$  – амплитуда ускорения ( $\text{м/с}^2$ ),  $u$  – тензор механических напряжений ( $H$ ),  $\omega$  – циклическая частота ( $\text{рад/с}$ ).

В результате проведения расчета были получены данные об эквивалентных напряжениях, перемещениях, выявлены зоны концентрации напряжений, а также зоны с большой относительной разницей напряжений в смежных элементах. Результаты расчета по воздействию ВВФ на МУЗЭ приведены в табл. 4.

Таблица 4. Результаты расчета по воздействию ВВФ на МУЗЭ  
 Table 4. Calculation results on impacting external influencing factors on MCSEU

№ узла	Наименование узла	Максимальная амплитуда ускорения по ГОСТ-30631-99, $\text{м/с}^2$	Пиковое ударное ускорение по ГОСТ-30631-99, $\text{м/с}^2$	Расчетная максимальная амплитуда ускорения МУЗЭ, $\text{м/с}^2$	Расчетное пиковое ударное ускорение МУЗЭ, $\text{м/с}^2$
1	Контейнер МУЗЭ	5	30	2,13	9,87
2	Сухой трансформатор ТСЗ 10/0,4 кВ			2,43	13,2
3	Двунаправленный инвертор			2,18	11,12
4	Блок накопителей электроэнергии			3,21	19,43

Напряженно-деформированное состояние смоделированной МУЗЭ с указанием этих зон приведено на рис. 9.

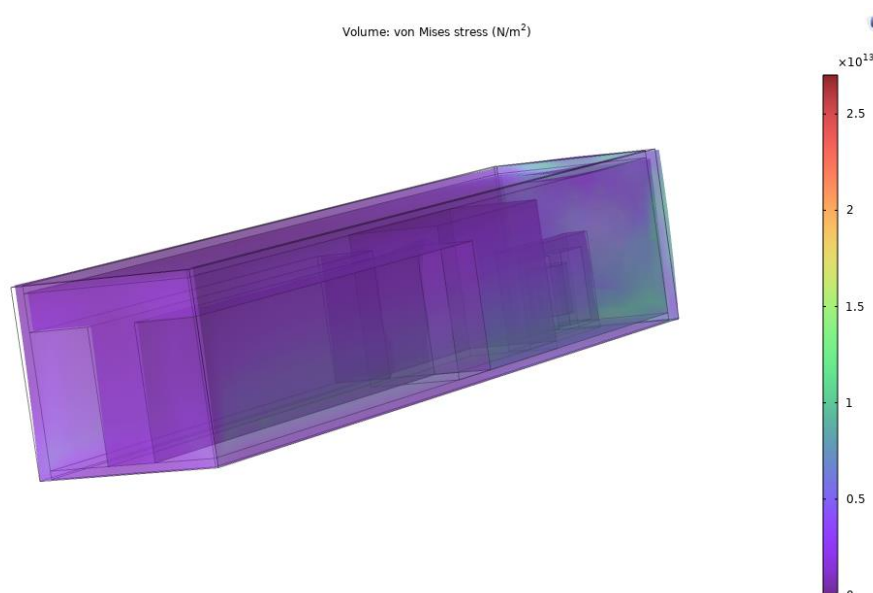


Рис. 9. Зоны напряженно-деформированного состояния МУЗЭ  
 Fig. 9. Zones of the MCSEU stress-strain state

<sup>5</sup> ГОСТ-30631-99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. М., 1999.

По результатам проведенного прочностного расчета для конструкции разрабатываемой МУЗЭ с помощью конечно-элементного моделирования в программном обеспечении COMSOL получены результаты, которые подтверждают механическую надежность разрабатываемой конструкции к ВВФ. Значения, приведенные в табл. 4, в частности значения максимальных амплитуд ускорения и пиковых ударных значений ускорения, меньше нормированных значений по ГОСТ-30631-99<sup>6</sup>, т. е. все элементы конструкции МУЗЭ выдержат прогнозируемые внешние воздействующие факторы.

### **Заключение**

Электротранспорт является одним из основных трендов в современном мире, однако в России есть серьезные преграды для развития данной области, в частности, слаборазвитая инфраструктура заряда электромобилей. Решением данной проблемы может стать использование МУЗЭ.

На стадии создания технического проекта возникла сложность с проведением испытаний, и было принято решение, что часть проверок будет проводиться посредством моделирования, а именно подтверждение соответствия МУЗЭ группам климатического (УХЛ1) и механического исполнения (М3).

Для моделирования выбрана программа COMSOL, которая позволяет проводить тепловые и прочностные расчеты. Первоначальным шагом является создание модуля из четырех АКБ для верификации на основе данных производителя.

Далее была произведена проверка на предварительное соответствие ГОСТ 15150-69<sup>7</sup> по варианту УХЛ1. При данной реализации МУЗЭ должна эксплуатироваться в диапазоне температур от  $-60^{\circ}$  до  $40^{\circ}$ , а наиболее зависимым оборудованием от окружающей среды являются АКБ ( $0\sim 35^{\circ}$ ). На основе данных моделирования установлено, что минимальной толщиной теплоизоляции для создания условий хранения АКБ является значение 100 мм. Также проверена заранее выбранная мощность системы отопления (20 кВт) и охлаждения (поддержание  $0^{\circ}$ ), результаты удовлетворительны для эксплуатации АКБ. Продемонстрированы и результаты, которые подтверждают механическую надежность МУЗЭ и соответствие нормируемых параметров ГОСТ-30621-99.

### **Благодарности**

Публикация статьи осуществлена в рамках проекта "Организация высокотехнологичного производства мобильных установок заряда электротранспорта высокой мощностью с интегрированной системой накопления электроэнергии", Соглашение № 075-11-2021-048 с Министерством образования и науки РФ от 25 июня 2021 г.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### **Библиографический список**

- Сафин А. Р., Ившин И. В., Цветков А. Н., Долломанюк Л. В. [и др.]. Изучение конструктивных особенностей мобильных установок заряда электротранспорта для разработки эскизной конструкторской документации // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2021а. Т. 13, № 3 (51). С. 15–24. EDN: KMOTRQ.
- Сафин А. Р., Ившин И. В., Цветков А. Н., Петров Т. И. [и др.]. Развитие технологии мобильных зарядных станций для электромобилей // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021б. Т. 23, № 5. С. 100–114. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114>. EDN: YIGCHH.
- Alipour M., Esen E., Kizilel R. Investigation of 3-D multi-layer approach in predicting the thermal behavior of 20 Ah Li-ion cells // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 153. P. 620–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.020>.
- Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2017. Vol. 62, Iss. 7. P. 3546–3550. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2614889>.
- Bei X., Zhu X., Coit D. W. A risk-averse stochastic program for integrated system design and preventive maintenance planning // European Journal of Operational Research. 2019. Vol. 276, Iss. 2. P. 536–548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.038>.
- Chalise D., Shah K., Prasher R., Jain A. Conjugate heat transfer analysis of thermal management of a Li-ion battery pack // Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage. 2018. Vol. 15, Iss. 1. Article number: 011008. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4038258>.

---

<sup>6</sup> ГОСТ-30631-99. Общие требования к машинам, приборам и другим техническим изделиям в части стойкости к механическим внешним воздействующим факторам при эксплуатации. М., 1999.

<sup>7</sup> ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. М., 2010.

- Cui S., Zhao H., Chen H., Zhang C. The mobile charging vehicle routing problem with time windows and recharging services // *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2018a. Vol. 2018. Article ID: 5075916. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5075916>.
- Cui S., Zhao H., Wen H., Zhang C. Locating multiple size and multiple type of charging station for battery electricity vehicles // *Sustainability*. 2018b. Vol. 10, Iss. 9. Article number: 3267. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093267>.
- Dong L., Han X., Hua L., Lan J. [et al.]. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press // *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. Vol. 29, Iss. 4. P. 1619–1628. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0333-5>.
- Gracheva E. I., Naumov O. V., Gorlov A. N. Modelling characteristics of reliability low-voltage switching devices on the basis of random checks on the example of contactors // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 20–22 November 2019. IEEE, 2019. P. 641–643. DOI: <https://doi.org/10.1109/SUMMA48161.2019.8947595>.
- Han T., Khalighi B., Yen C. H., Kaushik S. Li-ion battery pack thermal management: Liquid versus air cooling // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2019. Vol. 11, Iss. 2. Article number: 021009. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4041595>.
- Kostyukov V. N. Real-time condition monitoring of equipment // 7th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 2010, CM 2010/MFPT 2010, Stratford-upon-Avon, United Kingdom, 22–24 June 2010. Stratford-upon-Avon, 2010. P. 239–246. EDN: UEIETJ.
- Li C., Kim I. Y. Multi-material topology optimization for automotive design problems // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*. 2018. Vol. 232, Iss. 14. P. 1950–1969. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407017737901>.
- Li Z., Sahinoglu Z., Tao Z., Teo K. H. Electric vehicles network with nomadic portable charging stations // 2010 IEEE 72<sup>nd</sup> Vehicular Technology Conference Fall, Ottawa, Canada, 06–09 September 2010. IEEE, 2010. P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/VETECF.2010.5594437>.
- Liu K., Li K., Peng Q., Zhang C. A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles // *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 14, Iss. 1. P. 47–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0516-8>.
- Malik M., Dincer I., Rosen M. A., Mathew M. [et al.]. Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 129. P. 472–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.029>.
- Meng J., Luo G., Ricco M., Swierczynski M. [et al.]. Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, Iss. 5. Article number: 659. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8050659>.
- Muñoz P. M., Humana R. M., Falagüerra T., Correa G. Parameter optimization of an electrochemical and thermal model for a lithium-ion commercial battery // *Journal of Energy Storage*. 2020. Vol. 32. Article number: 101803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101803>.
- Neupane S., Alipanah M., Barnes D., Li X. Heat generation characteristics of LiFePO<sub>4</sub> pouch cells with passive thermal management // *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 5. Article number: 1243. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051243>.
- Patil M. S., Seo J.-H., Panchal S., Jee S. [et al.]. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2020. Vol. 155. Article number: 119728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119728>.
- Saqli K., Bouchareb H., Oudghiri M., M’Sirdi N. K. Critical review of ageing mechanisms and state of health estimation methods for battery performance // *Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of SEB 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies (SIST, vol. 163)* / eds.: J. Littlewood, R. J. Howlett, A. Capozzoli, L. C. Jain, Springer, Singapore, 2020. P. 507–518. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2_43).
- Shao S., Guan W., Bi J. Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption // *IET Intelligent Transport Systems*. 2017. Vol. 12, Iss. 3. P. 202–212. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2017.0008>.
- Sousa T. J. C., Monteiro V., Fernandes J. C. A., Couto C. [et al.]. New perspectives for vehicle-to-vehicle (V2V) power transfer // *IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington DC, 21–23 October 2018*. IEEE, 2018. P. 5183–5188. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591209>.
- Zhang R., Xia B., Li B., Cao L. [et al.]. State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles // *Energies*. 2018. Vol. 11, Iss. 7. Article number: 1820. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11071820>.
- Zhao C., Cao W., Dong T., Jiang F. Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channelled liquid flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 120. P. 751–762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.083>.

## References

- Safin, A. R., Ivshin, I. V., Tsvetkov, A. N., Dolomanyuk, L. V. et al. 2021a. The study of the design features of mobile installations for the charge of electric transport for the development of draft design documentation. *Bulletin of the Kazan State Power Engineering University*, 13(3-51), pp. 15–24. EDN: KMOTRQ. (In Russ.)
- Safin, A. R., Ivshin, I. V., Tsvetkov, A. N., Petrov, T. I. et al. 2021b. Development of the technology of mobile charging stations for electric vehicles. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(5), pp. 100–114. DOI: <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-5-100-114>. EDN: YIGCHH. (In Russ.)
- Alipour, M., Esen, E., Kizilel, R. 2019. Investigation of 3-D multi-layer approach in predicting the thermal behavior of 20 Ah Li-ion cells. *Applied Thermal Engineering*, 153. P. 620–632. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.020>.
- Aranovskiy, S., Bobtsov, A., Ortega, R., Pyrkin, A. 2017. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(7), pp. 3546–3550. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAC.2016.2614889>.
- Bei, X., Zhu, X., Coit, D. W. 2019. A risk-averse stochastic program for integrated system design and preventive maintenance planning. *European Journal of Operational Research*, 276(2), pp. 536–548. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.01.038>.
- Chalise, D., Shah, K., Prasher, R., Jain, A. 2018. Conjugate heat transfer analysis of thermal management of a Li-ion battery pack. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 15(1). Article number: 011008. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4038258>.
- Cui, S., Zhao, H., Chen, H., Zhang, C. 2018a. The mobile charging vehicle routing problem with time windows and recharging services. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2018. Article ID: 5075916. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/5075916>.
- Cui, S., Zhao, H., Wen, H., Zhang, C. 2018b. Locating multiple size and multiple type of charging station for battery electricity vehicles. *Sustainability*, 10(9). Article number: 3267. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10093267>.
- Dong, L., Han, X., Hua, L., Lan, J. et al. 2015. Effects of the rotation speed ratio of double eccentricity bushings on rocking tool path in a cold rotary forging press. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(4), pp. 1619–1628. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-015-0333-5>.
- Gracheva, E. I., Naumov, O. V., Gorlov, A. N. 2019. Modelling characteristics of reliability low-voltage switching devices on the basis of random checks on the example of contactors. *2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA)*, Lipetsk, Russia, 20–22 November 2019. IEEE, P. 641–643. DOI: <https://doi.org/10.1109/SUMMA48161.2019.8947595>.
- Han, T., Khalighi, B., Yen, C. H., Kaushik, S. 2019. Li-ion battery pack thermal management: Liquid versus air cooling. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 11(2). Article number: 021009. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4041595>.
- Kostyukov, V. N. 2010. Real-time condition monitoring of equipment. *7th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies 2010*, CM 2010/MFPT 2010, 22–24 June 2010. Stratford-upon-Avon, pp. 239–246. EDN: UEIETJ.
- Li, C., Kim, I. Y. 2018. Multi-material topology optimization for automotive design problems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232(14), pp. 1950–1969. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954407017737901>.
- Li, Z., Sahinoglu, Z., Tao, Z., Teo, K. H. 2010. Electric vehicles network with nomadic portable charging stations. *IEEE 72<sup>nd</sup> Vehicular Technology Conference Fall*, 06–09 September 2010. Ottawa, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/VETECF.2010.5594437>.
- Liu, K., Li, K., Peng, Q., Zhang, C. 2019. A brief review on key technologies in the battery management system of electric vehicles. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 14(1), pp. 47–64. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-018-0516-8>.
- Malik, M., Dincer, I., Rosen, M. A., Mathew, M. et al. 2018. Thermal and electrical performance evaluations of series connected Li-ion batteries in a pack with liquid cooling. *Applied Thermal Engineering*, 129, pp. 472–481. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.029>.
- Meng, J., Luo, G., Ricco, M., Swierczynski, M. et al. 2018. Overview of lithium-ion battery modeling methods for state-of-charge estimation in electrical vehicles. *Applied Sciences*, 8(5). Article number: 659. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8050659>.
- Muñoz, P. M., Humana, R. M., Falagüerra, T., Correa, G. 2020. Parameter optimization of an electrochemical and thermal model for a lithium-ion commercial battery. *Journal of Energy Storage*, 32. Article number: 101803. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101803>.
- Neupane, S., Alipanah, M., Barnes, D., Li, X. 2018. Heat generation characteristics of LiFePO<sub>4</sub> pouch cells with passive thermal management. *Energies*, 11(5). Article number: 1243. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11051243>.
- Patil, M. S., Seo, J.-H., Panchal, S., Jee, S. et al. 2020. Investigation on thermal performance of water-cooled Li-ion pouch cell and pack at high discharge rate with U-turn type microchannel cold plate. *International*

- Journal of Heat and Mass Transfer*, 155. Article number: 119728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2020.119728>.
- Saqli, K., Bouchareb, H., Oudghiri, M., M'Sirdi, N. K. 2020. Critical review of ageing mechanisms and state of health estimation methods for battery performance. *Sustainability in Energy and Buildings: Proceedings of SEB 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies (SIST, vol. 163)*. Eds.: J. Littlewood, R. J. Howlett, A. Capozzoli, L. C. Jain, Springer, Singapore, pp. 507–518. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2\\_43](https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2_43).
- Shao, S., Guan, W., Bi, J. 2017. Electric vehicle-routing problem with charging demands and energy consumption. *IET Intelligent Transport Systems*, 12(3), pp. 202–212. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-its.2017.0008>.
- Sousa, T. J. C., Monteiro, V., Fernandes, J. C. A., Couto, C. et al. 2018. New perspectives for vehicle-to-vehicle (V2V) power transfer. *IECON 2018 – 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington DC, 21–23 October, 2018, pp. 5183–5188. DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2018.8591209>.
- Zhang, R., Xia, B., Li, B., Cao, L. et al. 2018. State of the art of lithium-ion battery SOC estimation for electrical vehicles. *Energies*, 11(7). Article number: 1820. DOI: <https://doi.org/10.3390/en11071820>.
- Zhao, C., Cao, W., Dong, T., Jiang, F. 2018. Thermal behavior study of discharging/charging cylindrical lithium-ion battery module cooled by channelled liquid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 120, pp. 751–762. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2017.12.083>.

#### Сведения об авторах

**Петров Тимур Игоревич** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, ассистент; e-mail: [tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

**Timur I. Petrov** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Department Assistant; e-mail: [tobac15@mail.ru](mailto:tobac15@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-8914>

**Сафин Альфред Робертович** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: [sarkazan@bk.ru](mailto:sarkazan@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>

**Alfred R. Safin** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: [sarkazan@bk.ru](mailto:sarkazan@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1792-8780>

**Грачева Елена Ивановна** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

**Elena I. Gracheva** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

**Ившин Игорь Владимирович** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор; e-mail: [ivshini@mail.ru](mailto:ivshini@mail.ru)

**Igor V. Ivshin** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor; e-mail: [ivshini@mail.ru](mailto:ivshini@mail.ru)

**Цветков Алексей Николаевич** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: [tsvetkov9@mail.ru](mailto:tsvetkov9@mail.ru)

**Alexey N. Tsvetkov** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: [tsvetkov9@mail.ru](mailto:tsvetkov9@mail.ru)

**Басенко Василий Романович** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, ассистент; e-mail: [vasiliybas123@mail.ru](mailto:vasiliybas123@mail.ru)

**Vasiliy R. Basenko** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Department Assistant; e-mail: [vasiliybas123@mail.ru](mailto:vasiliybas123@mail.ru)