

Раздел III. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 004.94

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-192-200

А.А. Кажаров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИТИЕВЫХ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ

В данной работе рассмотрено 3D-проектирование литий-ионных аккумуляторных батарей для различных систем накопления энергии, в частности для средств индивидуальной мобильности. Актуальность разработки обоснована стремительно растущим рынком накопителей энергии на основе лития. Целью работы является сокращение времени проектирования индивидуальной литиевой батареи. Задача – создание информационной системы с автоматизированным проектированием батареи на основе заданных ограничений. Проведен обзор программных решений для создания 3D-моделей. Были использованы следующие программные технологии: программное обеспечение для создания трёхмерной компьютерной графики Blender, программная библиотека для создания и использования 3D-моделей ThreeJS. Разработан программный комплекс для проектирования литиевых аккумуляторов в 3D на основе клиент-серверной архитектуры. Разработанное решение позволяет формировать корпус и холдер автоматически с возможностью выгрузки файлов и печати на 3D принтере, а также провозволяет сократить процесс сборки аккумулятора благодаря автоматизированному проектированию и моделированию литиевой аккумуляторной батареи. Данная система проектирования способна находить решения на основе нечетких правил, благодаря чему у оператора есть возможность выбирать из множества решений, удовлетворяющих заданным ограничениям. Разработанное решение позволило сократить время сборки батареи в среднем на 40–50%, время проектирования до 1 секунды. Это дало возможность сократить стоимость изготовления батареи на 5–20%.

3D-моделирование; проектирование; САПР; литиевый аккумулятор; электропротранспорт.

А.А. Kazharov

USING 3D TECHNOLOGY TO DESIGN LITHIUM BATTERIES

This paper examines the 3D design of lithium-ion batteries for various energy storage systems, in particular for personal mobility devices. The relevance of the development is justified by the rapidly growing market for lithium-based energy storage devices. The goal of the work is to reduce the design time of a custom lithium battery. The task is to create an information system with automated battery design based on specified restrictions. A review of software solutions for creating 3D models was conducted. The following software technologies were used: software for creating three-dimensional computer graphics Blender, software library for creating and using 3D models ThreeJS. A software package has been developed for designing lithium batteries in 3D based on client-server architecture. The developed solution allows you to form the case and holder automatically with the ability to upload files and print on a 3D printer, and also allows you to shorten the battery assembly process thanks to automated design and modeling of a lithium bat-

tery. This design system is capable of finding solutions based on fuzzy rules, allowing the operator to choose from a variety of solutions that satisfy given constraints. The developed solution made it possible to reduce the battery assembly time by an average of 40–50%, and the design time to 1 second. This made it possible to reduce the cost of battery manufacturing by 5–20%.

3D modeling; design; CAD; lithium battery; electric transport.

Введение. Актуальность изучения вопросов 3D-моделирования литий-ионных аккумуляторных батарей (ЛИАБ) обусловлена стремительным ростом спроса и предложения на данный вид накопителей энергии. Благодаря устойчивой химии современных литиевых аккумуляторов производители добились высоких показателей в таких критических характеристиках как весовая и объемная плотность энергии и ресурс. Это позволило сделать литиевые аккумуляторы одними из самых востребованных видов накопителей энергии [1]. Области применения ЛИАБ самые различные: высокотокковые электроинструменты, электросамокаты, электроскутеры, электровелосипеды, инвалидные коляски на электроприводе, альтернативная энергетика, бытовые приборы, фонари, электромобили, смартфоны и т. д. В каждой из перечисленных областей существуют множество различных видов электроустройств, а те в свою очередь имеют множество моделей [2]. Если речь идет об электроинструментах, то можно выделить такие виды как электрошуруповерт, электросекатор, электропила и т.д. В свою очередь каждый из этих видов имеет различные модели от разных производителей и для разных сфер применения — отсутствует единый стандарт ЛИАБ, что обусловлено индивидуальным подходом к проектированию аккумулятора для каждого типа продукта. Если для одного потребителя энергии необходима высокая токоотдача, то для других критическим может быть рабочий температурный диапазон или емкость. В связи с этим проектирование и 3D-моделирование [3] является важной задачей, потребность в нем растет вместе с ростом применения ЛИАБ в различных областях науки и техники. Особенно актуально проектирование индивидуальных решений ЛИАБ для средств индивидуальной мобильности (СИМ).

Проблемы 3D-моделирования. Следует сразу отметить, что литиевые аккумуляторы бывают различных типов в зависимости от выбора катода [4]:

- 1) обычные литий-ионные (Li-Ion);
- 2) литий-железо-фосфатные (LiFePo4);
- 3) литий-никель-марганец-кобальт-оксидные (Li-NMC);
- 4) литий-титанатные (LTO) и т.д.

Сам по себе выбор типа литиевого аккумулятора уже является задачей проектирования, так как чаще всего выбор не всегда очевиден. Характеристики каждого типа варьируются с течением времени, так как технология производства все время улучшается, а, значит, при условно одной и той же химии достигаются разные значения таких параметров как весовая плотность энергии, объемная плотность энергии и т.д. В данной статье для упрощения рассмотрены лишь аккумуляторы типа Li-Ion для небольших аккумуляторных батарей до 5кВтч. ЛИАБ состоит из аккумуляторных ячеек Li-Ion и блока управления – система управления батареями (СУБ). Таким образом, речь идет не о проектировании однотипных элементов. Проблемы 3D-моделирования во многом определяются задачами САПР: компоновка, разбиение, размещение, трассировка [5, 6]. Моделирование или проектирование ЛИАБ является многокритериальной задачей. Основные критерии оптимизации:

- 1) стоимость ЛИАБ;
- 2) емкость ЛИАБ;
- 3) габариты;
- 4) вес;
- 5) мощность.

Емкость, габариты и вес, чаще всего, используются в контексте максимальных граничных условий. Допустим, необходимо спроектировать ЛИАБ с емкостью 20Ач, поместив его в посадочное место с габаритами 310 x 160 x 80 мм. Цель оптимизации: минимизация стоимости ЛИАБ. Постановка задачи может меняться в зависимости от требований рынка. Примером иной постановки задачи может служить та же задача, но без указания емкости ЛИАБ, критерием будет являться ёмкость ЛИАБ, а целью оптимизации, соответственно — максимизация критерия. Мощность задается в Ваттах и является минимальным граничным условием, то есть устанавливается минимальная граница мощности ЛИАБ, чтобы она могла удовлетворить потребителя достаточной токоотдачей. Сборку ЛИАБ можно условно разделить на 3 этапа:

1. Составление технического задания (ТЗ) и определения параметров ЛИАБ – занимает от 1-2 часов.
2. Проектирование ЛИАБ – занимает от 1-2 часов.
3. Сборка ЛИАБ – в среднем 4 часа на изготовление ЛИАБ.

Как видно, значительную часть временных затрат приходится на составление ТЗ, что связано с выбором типа литий-ионных аккумуляторов в том числе, и проектирование ЛИАБ. В этой связи необходимо иметь возможность не только решения задач оптимизации, но и 3D-моделирования ЛИАБ для точного воспроизведения топологии аккумуляторных батарей. Это значительно сокращает процесс проектирования и сборки ЛИАБ, а значит и стоимость производства или сборки. Существующие решения не позволяют детально проектировать ЛИАБ. Как правило, такие решения ограничиваются двумерным отображением лишь самих аккумуляторных ячеек без важнейшей детализации по трассировке балансировых проводов, платы СУБ и т.д. Такие схематичные визуализации не позволяют инженеру существенно сократить время сборки ЛИАБ. Другими словами они не решают ни одной задачи САПР.

Обзор программных решений для 3D-моделирования. Для 3D-моделирования были рассмотрены несколько программных решения:

1. DAZ Studio 3D.
2. XNALara XPS poser.
3. Cloak 3D.
4. Zbrush.
5. Autodesk 3Ds max.
6. 3D modelling App.
7. Blender 3D.
8. Metasequoia.

При разработке стабильного устойчивого программного комплекса необходимо использовать доступные инструменты со стабильной поддержкой от производителя, чтобы избежать эффекта «технологического долга» [7]. Данным термином обозначают явление накопления проблем в программном обеспечении (ПО), связанными с низким качеством кода или с устаревшим инструментарием. Технологический долг может появиться даже для ПО, разработанного с использованием новейших инструментов и технологий, если не обновлять время от времени ПО. Чаще всего, окружение, в котором функционирует ПО не является постоянным. Простейшие примеры изменения окружения – обновление операционной системы (ОС), браузера, появление новых промышленных стандартов. В связи с этим главным критерием при выборе ПО для создания 3D-моделей было отсутствие необходимости лицензий на их использование и свободный доступ к ПО. В этом случае исключается риск отзыва лицензии со стороны производителя. Данное ограничение снимает возможность использования таких решений как «Zbrush» и

«Autodesk 3Ds max». DAZ Studio 3D, как и XNALara XPS poser, являются решениями для работы со «скульптурами» – человеческими моделями. «Cloak 3D» и «3D modelling App» работают лишь в среде ОС Android. Это серьезное ограничение, которое делает неудобным их использованием. Наиболее подходящими программными решениями являются «Blender 3D» [8] и «Metasequoia». Для создания 3D моделей был выбран именно «Blender 3D», так как данный продукт разработан и поддерживается в том числе для ОС Linux [9]. Это является существенным преимуществом при разработке программных решений в условиях растущих ограничений на предоставление лицензий для ПО. Данная программа позволяет использовать популярные форматы 3D моделей: DAE, ABC, OBJ, STL, PLY, FBX, GLB, GLTF, X3D. В работе используется формат STL, так как данный формат поддерживается другими программными решениями: как слайсером [10] для 3D печати (Cura), так и фреймворками задействованными при разработке ПО.

3D-моделирование литиевой аккумуляторной батареи. Самый распространенный аккумулятор типа Li-Ion на данный момент имеет форм-фактор 18650, что расшифровывается следующим образом: диаметр 18 мм, высота 65 мм. Также при производстве ЛИАБ используются другие цилиндрические аккумуляторные ячейки со следующими форм-факторами: 21700, 26650, 32700, 4680. При создании 3D модели цилиндрического аккумулятора за основу был взят форм-фактор 18650. На рис. 1 изображена 3D-модель ячейки формата 18650 в среде моделирования «Blender 3D».

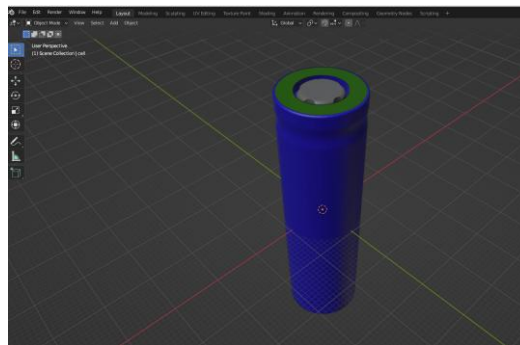


Рис. 1. 3D-модель Li-Ion аккумулятора 18650

При сборке ЛИАБ крайне важно создавать безопасные решения. Одним из главных способов, как обезопасить ЛИАБ, является использование изолирующих плюсовые контакты колец. Они позволяют исключить механическую деформацию изоляционных термоусадок аккумуляторных ячеек. На 3D модели они обозначены зеленым цветом. Благодаря этому инженеру, изготавливающему ЛИАБ, можно подробно рассмотреть не только сами ячейки, но изолирующие материалы, которые необходимо применить при изготовлении ЛИАБ. Также другой важной компонентой является использование системы управления батареями (СУБ). Данная система представлена в виде печатной платы, выполняющей следующие задачи:

- 1) ограничение тока заряда батареи;
- 2) ограничение тока разряда батареи;
- 3) отключение батареи от потребителя тока при индикации высокой температуры;
- 4) балансировка аккумуляторных ячеек по напряжению тока;
- 5) отключение батареи от потребителя при индикации высокой силы тока;
- 6) отключение батареи от источника заряда при индикации высокой силы тока.

Существуют корпусные и бескорпусные СУБ. Отличие корпусных СУБ в том, что они защищены плотным герметичным диэлектрическим корпусом, имея на выходе силовые провода и слаботочные провода для балансировки ЛИАБ. В ПО Blender 3D также была разработана 3D модель корпусной СУБ с силовыми и балансировочными проводами. На рис. 2 изображена отрисовка такой СУБ.

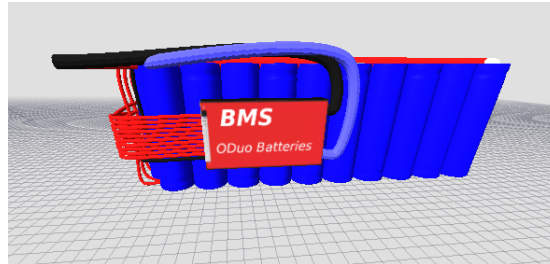


Рис. 2. 3D модель Li-Ion аккумулятора 18650

Разработка САПР. Разработан программный комплекс для автоматизированного проектирования ЛИАБ. Программный комплекс включает в себя серверную часть, разработанную с помощью языка программирования Java, и клиентскую часть, разработанную с помощью языков программирования HTML, JavaScript/JQuery [11]. Результатом проектирования является 3D-модель аккумуляторной батареи. Для отрисовки 3D модели всей аккумуляторной батареи на клиентской стороне использован фреймворк ThreeJS [12]. Данный фреймворк – это кроссбраузерная библиотека JavaScript [13], которая используется не только для отображения, но и для создания как статических 3D моделей, так и анимированных моделей при разработке веб-приложений. С помощью данного фреймворка создается 3D визуализация спроектированной на серверной части ЛИАБ. Как видно, на рис. 3 программа детально отобразила не только сами аккумуляторные ячейки, но и шины соединений, силовые провода, протрассированы балансировочные провода, размещена плата СУБ.

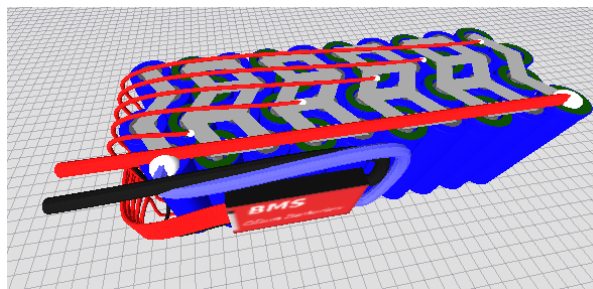


Рис. 3. 3D модель Li-Ion аккумулятора 18650

В разработанном веб-приложении предлагаются различные способы 3D компоновки ЛИАБ. Это позволяет оператору оценить размеры ЛИАБ и выбрать оптимальный вариант. Клиент-серверная архитектура позволяет обрабатывать множественные запросы на проектирование ЛИАБ параллельно.

Как видно на рис. 2 и 3 электрические провода отображаются кривыми. Для наглядности использованы кривые Безье [14] как для силовых проводов, так и для балансировочных проводов. Также отображены диэлектрические защиты плюсо-

вых контактов зелеными кольцами. Разработанная система также позволяет экспортировать 3D модель холдера в формате STL, что позволит его напечатать на 3D принтере.

Экспериментальные результаты. Серверная часть системы развернута на компьютере со следующими характеристиками: одноядерный процессор 1.33 ГГц, ОЗУ 1Гб, жесткий диск NVMe 15Гб. Клиентская часть реализована с адаптивным дизайном [15], что позволяет запрашивать проектирование и отрисовывать 3D модели как через персональный компьютер, так и через смартфон. На рис. 4 показан пример выдачи решений на основе введенных данных: напряжение, емкость, мощность. Также могут быть заданы и габаритные ограничения.

Напряжение(B)

Емкость(Ah)

Мощность мотора(W)

[Показать дополнительные настройки](#)

АКБ	Габариты	Цена (руб.)	Время сборки (дней)	
Li-NMC 24B 67Ah	403 x 110 x 89 мм.	23116	3	
Li-NMC 24B 42Ah	403 x 115 x 68 мм.	23951	60	
Li-NMC 24B 42Ah	403 x 115 x 68 мм.	23951	3	
Li-NMC 24B 67Ah	407 x 110 x 89 мм.	24334	3	
Li-NMC 24B 42Ah	407 x 115 x 68 мм.	25169	60	
Li-NMC 24B 42Ah	407 x 115 x 68 мм.	25169	3	
Li-NMC 24B 58Ah	263 x 165 x 89 мм.	25962	60	
Li-NMC 24B 58Ah	263 x 165 x 89 мм.	25962	3	
Li-Ion 24B 40Ah	170 x 151 x 75 мм.	26516	3	
Li-NMC 24B 58Ah	267 x 165 x 89 мм.	27180	60	

Showing 1 to 10 of 16 rows rows per page 1 2

Рис. 4. Пример выдача множества решений

Как видно из рис. 4, разработанная система предлагает 16 различных решений. Каждое решение отличается по массо-габаритным характеристикам, а также емкостью. Несмотря на заданную емкость система допускает незначительные отклонения в емкости при поиске решений. Таким образом, разработанная система выполняет функции системы поддержки принятия решений (СППР) [16] с использованием нечетких правил [17]. Есть возможность просмотра любого решения из данного списка в интерактивном формате 3D. На рис. 5 приведен один из примеров проектирования ЛИАБ из списка на основе вышеуказанных вводных данных. Характеристики решения: габариты – 289 x 200 x 75 мм., масса – 9110гр., емкость – 42Ач, тип ячеек – Lifepo4, типоразмер – 32700.

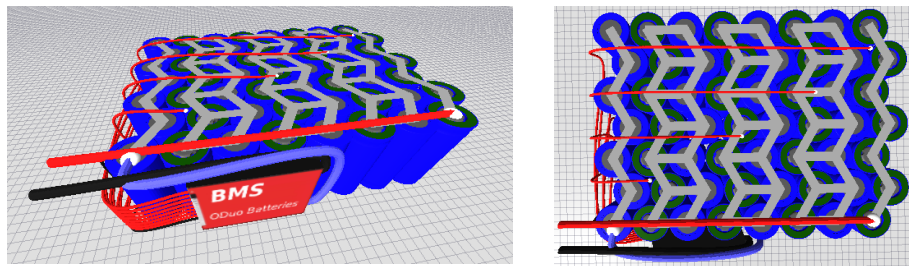


Рис. 5. Проект Lifepo4 24B 42Ah из ячеек формата 32700

Данное решение основано на рассчитанной схеме соединения 8S6P – 8 последовательно соединенных блоков, в каждом из которых по 6 ячеек, соединенных параллельно. Для этого решения система определила прямоугольное размещение. Поскольку используется клиент-серверная архитектура, рендеринг 3D-модели [18] происходит на клиентской части и быстродействие зависит от используемого устройства. Тестирование проводилось на десятках различных устройств, включая персональные компьютеры и смартфоны. Время рендеринга 3D модели не составляет более 400 мс. Время поиска и выдачи решений данной СППР – 100-400 мс.

Заключение. Разработанный программный комплекс позволяет менее, чем за секунду, создавать 3D модели ЛИАБ на основе шаблонов компоновки элементов сборки. Используемые технологии позволяют в режиме реального времени генерировать различные компоновки ЛИАБ и проектировать с учетом заданных ограничений. Проектирование в разработанной системе значительно облегчает инженеру разработку и сборку ЛИАБ, так как 3D визуализация является наглядным проектом. Разработанный программный комплекс отвечает на 2 важных вопроса проектирования ЛИАБ: возможно ли создать ЛИАБ в заданных ограничениях и какими техническими характеристиками обладает ЛИАБ. Благодаря разработанному программному комплексу оптимизировано проектирование ЛИАБ и снижена ее стоимость за счет сокращения объема работы оператора и инженера. В зависимости от размера ЛИАБ стоимость сокращается от 5% до 20%. На базе данного решения спроектированы и эксплуатируются более 100 ЛИАБ. Предложенный программный комплекс позволяет имплементировать эволюционные и роевые алгоритмы для проектирования ЛИАБ и решения задач САПР [19]. Данное решение реализовано и функционирует на веб-сайте www.oduobattery.ru [20].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Круглов П.Е.* Основные преимущества и недостатки литий-ионных аккумуляторов // Качество в производственных и социально-экономических системах: Сб. научных трудов 8-й международной научно-технической конференции. – Курск, 2020. – С. 247-250.
2. *O'Dea S.* Lithium-ion batteries – statistics & facts. – URL: <https://www.statista.com/top-ics/2049/lithium-ion-battery-industry>. – Режим доступа: свободный (дата обращения: 22.04.2023).
3. *Серова М.* Учебник-самоучитель по трехмерной графике в Blender 3D. Моделирование, дизайн, анимация, спецэффекты. – М.: Изд-во «Солон-пресс», 2021. – 272 с.
4. *Мелансон С.* Сравнение шести типов литий-ионных аккумуляторов и их потенциала для СНЭЭ // Энергоэксперт. – 2023. – № 3 (87). – С. 64-65.
5. *Курейчик В.В., Курейчик В.В.* Биоинспирированный поиск при проектировании и управлении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 178-183.
6. *Курейчик В.М., Кажаров А.А.* Алгоритмы эволюционного роевого интеллекта в решении задачи разбиения графа // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции "Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС)". – 2012. – Т. 1. – С. 237-242.
7. *Oscar Baechler, Xury Greer.* Blender 3D By Example. – Second Edition. – Packt Publishing Ltd, 2020. – 658 p.
8. *Neil Ernst, Julien Delange.* Technical Debt in Practice: How to Find It and Fix It. – The MIT Press, 2021. – 288 p.
9. *Лисьяк В.В., Кулиев Э.В.* Программное обеспечение слайсинга в 3D-печати // Тр. Международного научно-технического конгресса «Интеллектуальные системы и информационные технологии – 2020» («ИС и ИТ-2020», «IS&IT'20»). Научное издание в 2-х т. Т. 1. – С. 331-347.
10. *Уэйли Б., Хейн Т., Снайдер Г., Немет Э.* Unix и Linux: руководство системного администратора. – 4-е изд. – Изд-во: Диалектика-Вильямс, 2018. – 1314 с.
11. *Бер Бибо, Иегуда Кац.* jQuery. Подробное руководство по продвинутому JavaScript. – 2-е изд. – Изд-во «Символ-Плюс», 2023. – 612 с.

12. Jos Dirksen. Learn Three.js. – 4 ed. – Packt Publishing Ltd, 2023. – 554 p.
13. Лукас Д.К. Тестирование JavaScript. – Изд-во «Manning», 2023. – 592 с.
14. Кривая Безье. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кривая_Безье (дата обращения: 20.06.2022).
15. Кедлек Т. Адаптивный дизайн. Делаем сайты для любых устройств. – СПб.: Изд-во «Питер», 2013. – 289 с.
16. Сизова О.В. Системы поддержки принятия решений: учеб. пособие. – Изд-во: ИГХТУ – Иваново, 2017. – 61 с.
17. Гладков Л.А., Кажаров А.А. Гибридный нечетко-генетический алгоритм для решения задачи коммивояжера // Тр. IV-й Международной научно-практической конференции "Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте". – Коломна, 2009.
18. Рендер (Рендеринг) – что это такое, как работает и зачем нужен в 3D, видео и играх. – URL: <https://dzen.ru/a/YMmwcJgx3UYavMSP> (дата обращения: 10.07.2023).
19. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Роевой интеллект в решении графовых задач // Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2013): Сб. трудов. – СПб., 2013. – С. 31-34.
20. ODUO Batteries: первый сайт кастомных батарей. – URL: <https://dzen.ru/media/id/632630e9302fdb6e65085791/oduo-batteries-pervyi-sait-kastomnyh-akb-632634dc47b76016e2b5e850> (дата обращения: 12.08.2023).

REFERENCES

1. Kruglov P.E. Osnovnye preimushchestva i nedostatki lityi-ionnykh akkumulyatorov [The main advantages and disadvantages of lithium-ion batteries], *Kachestvo v proizvodstvennykh i sotsial'no-ekonomicheskikh sistemakh: Sb. nauchnykh trudov 8-y mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Quality in production and socio-economic systems: Collection of scientific papers of the 8th international scientific and technical conference]. Kursk, 2020, pp. 247-250.
2. O'Dea S. Lithium-ion batteries – statistics & facts. Available at: <https://www.statista.com/topics/2049/lithium-ion-battery-industry> (Accessed 22 April 2023).
3. Serova M. Uchebnik-samouchitel' po trekhmernoy grafike v Blender 3D. Modelirovanie, dizayn, animatsiya, spetseffekty [Self-instruction manual on three-dimensional graphics in Blender 3D. Modeling, design, animation, special effects]. Moscow: Izd-vo «Solon-press», 2021, 272 p.
4. Melanson S. Sravnenie shesti tipov lityi-ionnykh akkumulyatorov i ikh potentsiala dlya SNEE [Comparison of six types of lithium-ion batteries and their potential for energy saving], *Energoekspert* [Energexpert], 2023, No. 3 (87), pp. 64-65.
5. Kureychik V.V., Bioinspirirovannyi poisk pri proektirovanii i upravlenii [Bio-inspired search in design and management], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 178-183.
6. Kureychik V.M., Kazharov A.A. Algoritmy evolyutsionnogo roevogo intellekta v reshenii zadachi razbieniya grafa [Algorithms for evolutionary swarm intelligence in solving the problem of graph partitioning], *Sb. trudov Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)"* [Collection of articles. Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference "Problems in the development of advanced micro- and nanoelectronic systems (MES)"], 2012, Vol. 1, pp. 237-242.
7. Oscar Baechler, Xury Greer. Blender 3D By Example. Second Edition. Packt Publishing Ltd, 2020, 658 p.
8. Neil Ernst, Julien Delange. Technical Debt in Practice: How to Find It and Fix It. The MIT Press, 2021, 288 p.
9. Lisyak V.V., Kuliev E.V. Programmnoe obespechenie slaysinga v 3D-pechati [Slicing software in 3D printing], Tr. Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa «Intel'kual'nye sistemy i informatsionnye tekhnologii – 2020» («IS i IT-2020», «IS&IT'20») [Proceedings of the International Scientific and Technical Congress "Intelligent systems and Information Technologies – 2020" ("IS and IT-2020", "IS&IT'20")]. Scientific publication in 2 vols. Vol. 1, pp. 331-347.

10. Ueyli B., Kheyn T., Snayder G., Nemet E. Unix i Linux: rukovodstvo sistemnogo administratora [Unix and Linux: System Administrator's Guide]. 4th ed. Izd-vo: Dialektika-Vil'yams, 2018, 1314 p.
11. Ber Bibo, Ieguda Kats. jQuery. Podrobnoe rukovodstvo po prodvinutomu JavaScript [A comprehensive guide to advanced JavaScript]. 2nd ed. Izd-vo «Simvol-Plyus», 2023, 612 p.
12. Jos Dirksen. Learn Three.js. 4 ed. Packt Publishing Ltd, 2023, 554 p.
13. Lukas D.K. Testirovanie JavaScript [JavaScript testing]. Izd-vo «Manning», 2023, 592 p.
14. Krivaya Bez'e [Bezier curve]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Krivaya_Bez'e (accessed 20 June 2022).
15. Kedlek T. Adaptivnyy dizayn. Delaem sayty dlya lyubyykh ustroystv [Adaptive design. We make websites for any device]. Saint Petersburg: Izd-vo «Pi-ter», 2013, 289 p.
16. Sizova O.V. Sistemy podderzhki prinyatiya resheniy: ucheb. posobie [Decision support systems: textbook]. Izd-vo: IGKhTU – Ivanovo, 2017, 61 p.
17. Gladkov L.A., Kazharov A.A. Gibrinny nechetko-geneticheskiy algoritm dlya resheniya zadachi kommvoyazhera [Hybrid fuzzy-genetic algorithm for solving the traveling salesman problem] Tr. IV-y Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Integrirovannyye modeli i myagkie vychisleniya v iskusstvennom intellekte" [Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence"]. Kolomna, 2009.
18. Render (Rendering) – chto eto takoe, kak rabotaet i zachem nuzhen v 3D, video i igrakh [Rendering (Rendering) - what it is, how it works and why it is needed in 3D, video and games]. Available at: <https://dzen.ru/a/YMmwcJgx3UYavMSP> (accessed 10 July 2023).
19. Kureychik V.M., Kazharov A.A. Roevoy intellekt v reshenii grafovyykh zadach [Swarm intelligence in solving graph problems], Mezhdunar. konf. po myagkim vychisleniyam i izmereniyam (SCM'2013): Sb. trudov [International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'2013): Proceedings]. Saint Petersburg, 2013, pp. 31-34.
20. ODuo Batteries: pervyy sayt kastomnykh batarey [ODuo Batteries: the first custom battery site]. Available at: <https://dzen.ru/media/id/632630e9302fdb6e65085791/oduo-batteries-pervyi-sait-kastomnykh-akb-632634dc47b76016e2b5e850> (accessed 12 August 2023).

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор С.П. Малуков.

Кажаров Аскер Артурович – Южный федеральный университет; e-mail: aakazharov@sfedu.ru; с. Александрова Коса, Россия; тел.: +79064233689; кафедра САПР; к.т.н.; старший преподаватель.

Kazharov Asker Arturovich – Southern Federal University; e-mail: aakazharov@sfedu.ru; Alexandrova Kosa, Russia; phone: +79064233689; the department of CAD; cand. of eng. sc.; senior lecturer.

УДК 621.315.592

DOI 10.18522/2311-3103-2023-4-200-210

Б.М. Середин, В.П. Попов, А.В. Малибашев, А.А. Скиданов, М.Б. Зиненко

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В НАГРЕВАТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ДЛЯ ТЕРМОМИГРАЦИИ ЖИДКИХ ВКЛЮЧЕНИЙ В КРЕМНИИ

Жидкие включения мигрируют в твёрдых телах в направлении градиента температуры. Это даёт уникальную возможность формировать в пластинах кремния кристаллически совершенные структуры со сквозными легированными эпитаксиальными каналами или замкнутыми ячейками, представляющими интерес при конструировании силовых полупроводниковых приборов и фотоэлектрических преобразователей. Причем конкурентных методов изготовления таких структур нет, поскольку скорость термомиграции на четыре порядка превышает скорость твердотельной диффузии. Однако практическое применение метода термомиграции (ТМ) в полупроводниковой электронике сдерживается пере-