

МАШИНОСТРОЕНИЕ / MECHANICAL ENGINEERING

УДК 629.3.01:004.94

DOI: 10.15507/2658-4123.030.202003.464-479



Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей

М. В. Чугунов*, И. Н. Полунина, А. М. Пьянзин
ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

*m.v.chugunov@mail.ru

Введение. Национальные технологические инициативы, направленные на разработку и внедрение в инженерную практику средств High-Tech и основанные на концепции «Индустрия 4.0», требуют соответствующих технических решений для всех этапов жизненного цикла изделия от проектирования до утилизации. Реализация концепции предполагает формирование технологических групп и рынков по разным направлениям, в частности Auto.Net. При этом стадия проектирования изделия является базовой и должна быть реализована в форме, обеспечивающей весь жизненный цикл изделия на принципах этой концепции.

Материалы и методы. В статье представлена методика и результаты проектирования электромобиля-трайка в среде интегрированных CAD/CAE-систем. Процесс проектирования представляет собой разработку цифровых параметрических моделей разного типа и уровня по принципу сверху-вниз и снизу-вверх. Параметрические свойства моделей обеспечивают возможности эффективной многовариантной разработки проектных решений, включая конструирование, анализ, оптимизацию. Проектные решения разработаны в среде CAD/CAE/CAM/PDM/PLM SolidWorks (Motion, Simulation).

Результаты исследования. Результатами исследования являются рациональные траектории проектирования конструкций рассматриваемого класса в среде SolidWorks, а также проектное решение электромобиля-трайка в виде системы интегрированных параметрических моделей, включая 3D-модели деталей и сборок, модели теоретической механики, конечно-элементные модели для решения задач механики деформируемого твердого тела в виде линейной и нелинейной статики, линейной и нелинейной динамики. Для наглядности приводятся видеоролики, иллюстрирующие полученные результаты.

Обсуждение и заключение. В исследовании представлена траектория проектирования электромобиля-трайка, основанная на корректной постановке задач проектирования и предусматривающая рациональный выбор средств, инструментов и технологий из штатного функционала SolidWorks. Траектория проектирования обеспечивает как эффективное решение задач проектирования, так и оценку адекватности полученных результатов. В части возможной перспективы этой работы следует указать решение оптимизационных задач по различным критериям эффективности проекта, разработку интегрированной (цифровой и натурной) модели электромобиля-трайка, в цифровой части отвечающей требованиям, предъявляемым к цифровым двойникам. При этом двунаправленные ассоциативные связи между виртуальной и натурной составляющими интегрированной модели позволяют решить ряд дополни-

© Чугунов М. В., Полунина И. Н., Пьянзин А. М., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License.
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

тельных задач: контроль точности цифровых моделей, наделение цифровой модели синергетическими свойствами, планирование траектории движения и беспилотное управление на принципах IoT (интернета вещей).

Ключевые слова: электромобиль, CAD, CAE, динамика и прочность, моделирование транспортных средств, МКЭ, цифровой двойник для электромобиля

Для цитирования: Чугунов, М. В. Проектирование электромобиля-трайка на базе параметрических CAD/CAE-моделей / М. В. Чугунов, И. Н. Полунина, А. М. Пьянзин. – DOI 10.15507/2658-4123.030.202003.464-479 // Инженерные технологии и системы. – 2020. – Т. 30, № 3. – С. 464–479.

E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models

M. V. Chugunov*, I. N. Polunina, A. M. Pjanzin

National Research Mordovia State University (Saransk, Russia)

**m.v.chugunov@mail.ru*

Introduction. National Technology Initiatives (STI), designed to develop and implement High-Tech tools into engineering practice and based on the Industry 4.0 concept, require appropriate technical solutions for all phases of the product lifecycle from design to disposal. Implementation of the concept involves the formation of technological groups and markets in different directions in particular one of the emerging markets of STI is Auto.Net. At the same time, the product design stage is basic and should be implemented in a form ensuring the entire life cycle of the product on the principles of this concept.

Materials and Methods. The article presents the methodology and results of designing an electric vehicle-tricycle in the integrated CAD/CAE systems. The design process is the development of digital parametric models of different types and levels on a top-down and bottom-up basis. The parametric properties of models provide the ability to develop design solutions efficiently, including design, analysis and optimization.

The design solutions are developed in the CAD/CAE/CAM/PDM/PLM SolidWorks (Motion, Simulation) software.

Results. The results of the study are rational design paths for the structures of the class under consideration in the SolidWorks software, as well as design solution of the electric tricycle-vehicle in the form of a system of integrated parametric models, including 3D models of parts and assemblies, models of solid-state mechanics, finite-element models for solving problems of mechanics of the deformed solid body in the form of linear and non-linear statics, linear dynamics, parametric optimization. Videos of the results are provided for illustrative purposes.

Discussion and Conclusion. In the research, the design trajectory of the electric vehicle-tricycle based on correct formulation for the design problems and providing the rational choice of means, tools, and technologies from basic SolidWorks functionality is presented. The trajectory provides both an efficient solution to design problems and an assessment of the adequacy of the results obtained. In terms of the possible perspective of this work, it is necessary to specify the solution of optimization tasks according to various criteria of project efficiency and the development of an integrated (cyber-physical) model of electric vehicle-tricycle, which meets the requirements of digital twins. At the same time, bidirectional associative links between virtual and physical components of the integrated model will solve a number of additional problems: control of the accuracy of digital models, giving the digital model synergistic properties, planning of the trajectory and unmanned control on the principles of IoT (Internet of Things).

Keywords: electric vehicle, CAD, CAE, dynamics and strength, vehicle modeling, FEM, digital twin for car

For citation: Chugunov M.V., Polunina I.N., Pjanzin A.M. E-Tricycle Vehicle Design Based on Parametric CAD/CAE Models. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2020; 30(3):464-479. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.030.202003.464-479>

Введение

Национальные технологические инициативы (НТИ), основанные на концепции «Индустрия 4.0», предусматривают существенное расширение технологических сред по составу, совершенствование их структуры, повышение эффективности методов конструкторской и технологической подготовки производства¹ [1]. При этом этап проектирования производственного процесса является базовым, включает в себя разработку интегрированных моделей проектируемого объекта разного типа и должен быть реализован в форме, обеспечивающей весь жизненный цикл изделия на принципах концепции [2].

Современные методы и средства проектирования (в частности CAD/CAE), по существу, представляют собой технологии Hi-Tech и отличаются высокой эффективностью. Они изменили содержание не только проектно-конструкторской, но и исследовательской деятельности прикладного характера. В этих условиях решение инженерных задач для широкого спектра технических систем сводится к корректной постановке задачи, рациональному выбору средств, инструментов и технологий ее решения, обоснованной оценке и интерпретации полученных результатов. Математические и программно-алгоритмические модели разрабатываются, как правило, в виде приложений к уже существующим системам в тех случаях, когда штатный функционал этих систем не позволяет решить поставленную задачу в полном объеме.

Поскольку тяжелые CAD/CAE-системы обладают весьма широким, разнообразным функционалом и развитым интерфейсом, то актуальной является

проблема формирования рациональной (оптимальной) траектории проектирования, которая состоит в обоснованном выборе типа используемых моделей, а также инструментов и методов для их разработки и анализа. Эта траектория всегда специфична как для объекта, так и для среды проектирования.

В данной работе рассматривается задача формирования траектории проектирования для электромобиля-трайка в среде SolidWorks (Motion Simulation). В качестве основного инструмента используется параметризация разрабатываемых моделей как на уровне CAD-, так и на уровне CAE-сред. Таким образом, результатом проектирования является цифровая интегрированная параметрическая модель конструкции. Необходимо уточнить смысл используемых нами понятий (параметризация и интегрированность моделей), которые в литературе часто трактуются неоднозначно. Параметрические модели обладают двумя основными свойствами: зависимость модели от набора переменных, варьируемых в заданном диапазоне; независимость сформированных в процессе проектирования взаимосвязей (отношений) от значения переменных. Интегрированность модели состоит в реализации двунаправленных ассоциативных связей между составляющими ее моделями разного типа и уровня.

Обзор литературы

Преимущества параметрического проектирования проявляют себя в двух основных аспектах: повышение творческого потенциала конструктора при вариантном проектировании; упрощение постановки и решения задачи параметрической оптимизации, если все или

¹ Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 208 с.

часть параметров модели рассматриваются в качестве управляемых.

Как правило, в литературе даются различные техники и подходы к параметризации именно в этих двух аспектах².

При разработке интегрированных моделей параметризация имеет свои специфические особенности. Так, в интегрированных CAD/CAE-средах параметризация конечно-элементной модели предполагает ассоциативные связи между глобальными переменными и конечно-элементной сеткой. Вопросы подобного рода подробно рассмотрены в ряде работ³ [3]. Следует отметить также, что каждый конкретный вариант параметризации тесно связан с типом модели твердого тела (объемное тело, оболочка, стержневая система и т. д.) и с постановкой задачи в целом. Так, для автомобильной техники вопросы параметризации рассмотрены в следующих аспектах: из условий безопасности водителя, для проектирования несущих систем и кузова⁴ [4].

Среди задач анализа конструкции следует прежде всего выделить задачи многотельной механики, рассматривающей системы тел (поддресоренных и неподдресоренных масс), связанных между собой при помощи упругих и диссипативных элементов. В математической части решение задачи сводит-

ся к системам дифференциальных и алгебраических уравнений⁵.

Для реальных конструкций такие модели включают в себя несколько десятков (или более) твердых тел, что существенно усложняет как аналитический вывод уравнений движения, так и их решение.

Технологии проектирования и анализа проектных решений в среде современных CAD/CAE-систем не предполагают непосредственное формирование пользователем математических моделей, однако корректная постановка задачи невозможна без глубокого знания и понимания базовых положений механики твердого тела⁶.

Технические особенности самой конструкции и технологические аспекты ее анализа в той или иной среде проявляют себя в необходимости интегрировать разные программные среды. Так, решение задачи многотельной механики реализовано в интегрированных средах EULER и CAE Fidesys [5].

Чаще всего в литературе приводятся результаты решения частных задач для анализа состояния и поведения элементов конструкции автомобиля. В таких случаях весьма важной проблемой является выбор и реализация средств интеграции программных систем разного типа.

В одной из работ выполнено моделирование на основе Matlab/Simulink

² **К. К. Choi, N.-H. Kim.** Introduction to Structural Design. In: Structural Sensitivity Analysis and Optimization 1 // Mechanical Engineering Series. New York: Springer, 2005. Pp. 3–36. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/0-387-27169-4_1 (дата обращения: 07.08.2020); **Duddeck F., Zimmer H.** Modular Car Body Design and Optimization by an Implicit Parameterization Technique via SFE CONCEPT // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. 2013. Pp. 413–424. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-33835-9_39 (дата обращения: 07.08.2020).

³ The Parametrical Design and Optimization of Body Frame Based on Crashworthiness and Lightweight / Y. Men [et al.] // Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. 2013. Pp. 349–360. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-33835-9_33 (дата обращения: 07.08.2020); Methods for the Design and Development / H. Anacker [et al.] // Design Methodology for Intelligent Technical Systems. Heidelberg: Springer, 2014. Pp. 183–500. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-45435-6_5 (дата обращения: 07.08.2020).

⁴ The Parametrical Design and Optimization...

⁵ **Тарасик В. П.** Теория движения автомобиля: учебник для вузов. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 478 с.

⁶ Developments of Multibody System Dynamics: Computer Simulations and Experiments / Y. Wan.-Suk [et al.] // Multibody System Dynamics. 2007. Vol. 18. Pp. 35–38. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11044-007-9062-6> (дата обращения: 07.08.2020).

и Universal Mechanism для взаимодействия шины с опорной поверхностью и модель антиблокировочной системы тормозов (АБС) в целом [6]. Задача анализа эксплуатационной нагруженности рамы автомобиля решена в другой работе, при этом последовательность нагружения формируется в системе FRUND, а анализ напряженно-деформированного состояния – в системах SolidWorks Simulation и Ansys [7]. Представлен обзор программных средств, поддерживающих интеграцию в виде Standalone и AddIn приложений [8]. Для инженера второй вариант является предпочтительней, поскольку непосредственно позволяет решать задачу проектирования во взаимосвязи с другими этапами жизненного цикла изделия, используя единый программный и пользовательский интерфейс CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM/PLM.

Выполнен сравнительный анализ динамических характеристик автомобиля на базе Truck-Sim и ADAMS на разных сценариях поведения, рассматриваются вопросы прочности для шаровой опоры передней подвески автомобиля, в частности выполнен конечно-элементный анализ пальца шаровой опоры [9; 10]. Подробно рассмотрены вопросы моделирования и анализа кинематических пар (шарнирных соединений), актуальных для систем автомобильных подвесок и конструкции автомобиля в целом, конструктивные и кинематические схемы, а также исследованы возможные модели для подвесок [11–14]. Выполнен анализ несущих систем автомобиля [15; 16].

Представлены концептуальные аспекты интеграции инструментов и объектов 3D-моделирования с программными средами решения задач динамического анализа, реализованными в виде объектно-ориентированной библиотеки DAMOS-C [17]. Такой подход позволяет внедрить собственные математические модели в CAE-среды на уровне исходных текстов.

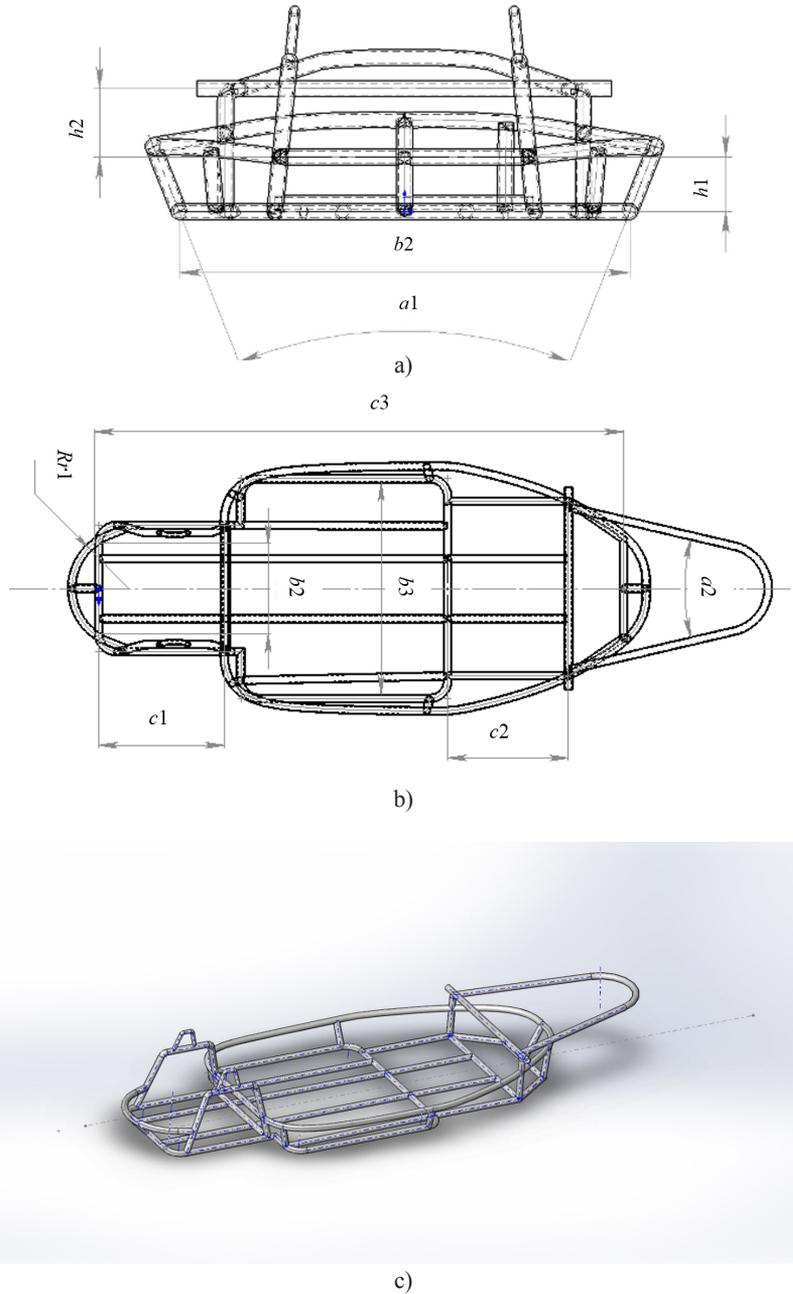
Задачи моделирования автомобиля, включая все его системы в их взаимосвязи и в одной интегрированной среде, в литературе встречаются, как правило, в упрощенном виде [18]. Исключением является работа С. Алексева и коллег, в которой построена модель для анализа состояния и поведения BIW-системы (body in white) автомобиля, соответствующая требованиям, предъявляемым к цифровому двойнику [19].

Материалы и методы

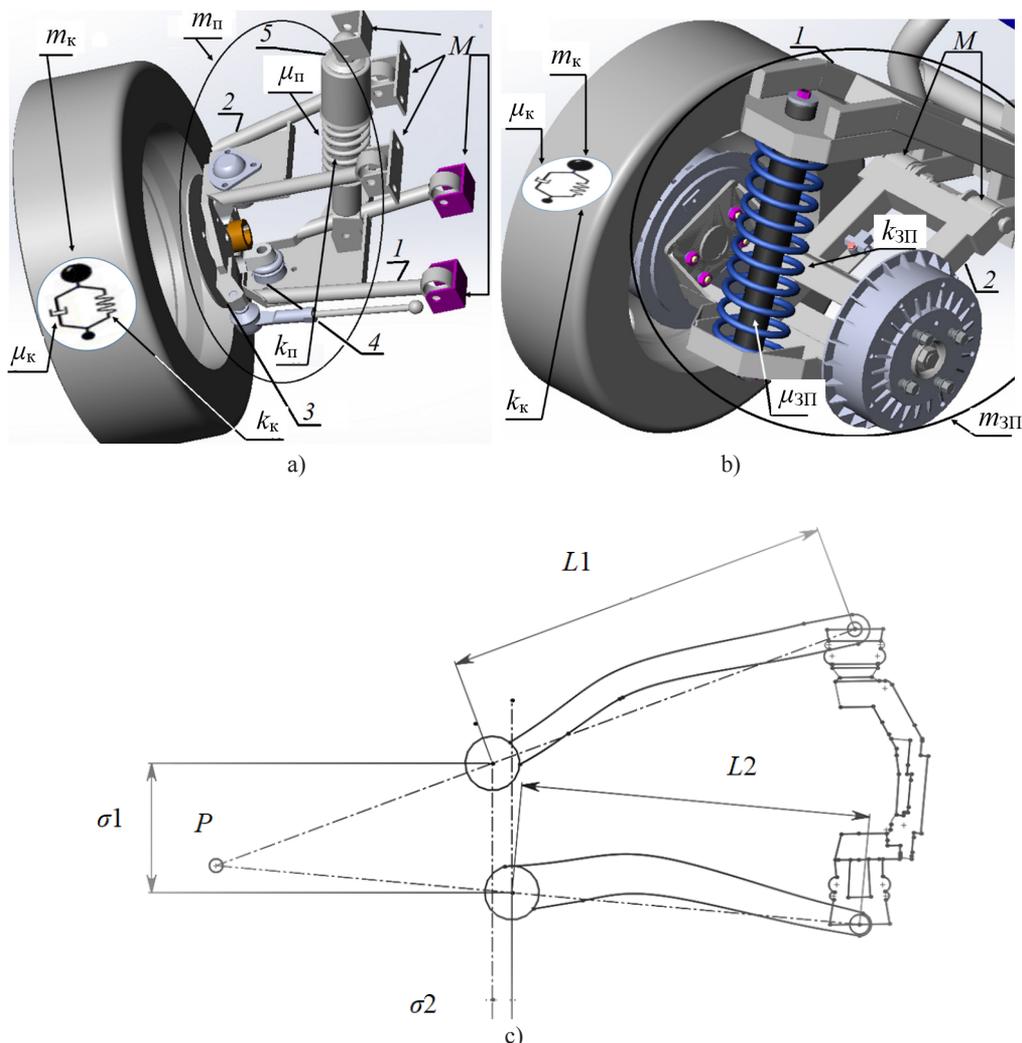
Электромобиль-трайк включает в себя следующие основные системы: несущую раму, передние и заднюю подвески с мотор-колесами, систему рулевого управления, систему трансформации, кузов.

На рисунке 1 показана 3D-модель и чертеж рамы с размерами, связанными со значениями соответствующих глобальных переменных ($b_i, c_i, h_j, a_k, k = 1, 2, i = 1, 3, j = 1, 2, R_{r1}$). Модель построена на основе трехмерного эскиза, а твердотельные элементы представляют собой трубы с кольцевым поперечным сечением (в терминологии SolidWorks – «сварные конструкции»). Такой вариант проектирования представляется в данном случае более рациональным, по сравнению с возможной альтернативной процедурой «по траектории», за счет многовариантности обработки соединений труб.

На рисунке 2а показана 3D-модель базового варианта двухрычажной передней подвески, совмещенная с элементами динамической схемы конструкции. Конструкция сборки включает в себя следующие основные детали: рычаг верхний 1, рычаг нижний 2, поворотный кулак 3, шаровой шарнир 4, амортизатор 5. Здесь m_k, m_n – массы; μ_k, μ_n – коэффициенты демпфирования; k_k, k_n – коэффициенты жесткости колеса и подвески соответственно; M – масса электромобиля за исключением указанных систем и деталей. Аналогичным образом динамическую схему и конструкцию задней



Р и с. 1. Несущая рама
F i g. 1. Chassis frame



Р и с. 2. а) передняя подвеска; б) задняя подвеска; в) мгновенный центр поворота
 Fig. 2. a) front suspension; b) rear suspension; c) instantaneous center of rotation

подвески иллюстрирует рисунок 2б. На этом рисунке индексы «зп» для параметров массы, упругости и диссипации соответствуют задней подвеске.

Конструкция рычагов подвески была модифицирована нами так, чтобы обеспечить возможность варьи-

ровать и контролировать положение мгновенного центра поворота подвески (рис. 2с), а также для наиболее рационального создания конечно-элементной сетки [13].

Видеоролики иллюстрируют параметрические свойства этих моделей⁷.

⁷ Видеоролик № 1 [Электронный ресурс]. URL: https://drive.google.com/file/d/1ESeFg2tvZBdMCB7H4n_kxcDsFRf0wVm/view?usp=sharing (дата обращения: 07.08.2020); Видеоролик № 2 [Электронный ресурс]. URL: https://drive.google.com/file/d/1H1RGtTdX9kdqHi9Pyb4OeYNb_k0kFiDr/view?usp=sharing (дата обращения: 07.08.2020).

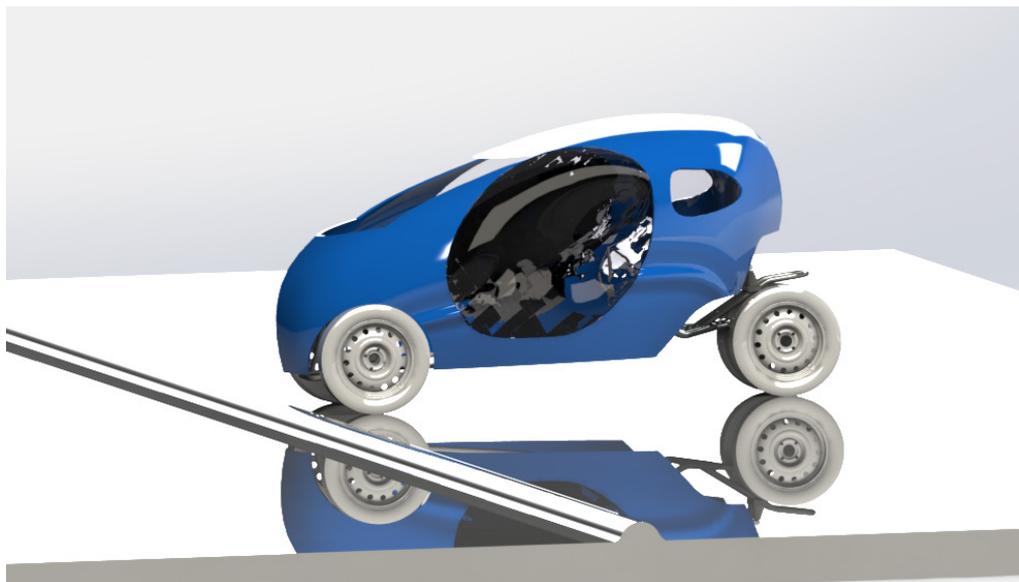
3D-модель конструкции в целом реализована как многоуровневая сборка, фотореалистическое изображение которой сформировано средствами SolidWorks PhotoView и приведено на рисунке 3.

В среде SolidWorks Motion реализовано решение задачи анализа динамических характеристик электромобиля, преодолевающего препятствие в виде лежащего полицейского при заданной скорости движения, результат моделирования проиллюстрирован видеороликом⁸. Колебания электромобиля в вертикальном направлении, которые можно наблюдать в этом ролике, связаны с включением силы тяжести в начальный момент движения.

Важными особенностями постановки данной задачи в терминах механики деформируемого твердого тела являются следующие.

1. Для анализа сопряжений в сборке используется модель твердого тела. Возникающие при этом деформации считаются пренебрежимо малыми и не учитываются. Подобным образом без учета локальных деформаций и диссипативных эффектов моделируются все сопряжения типа «концентричность».

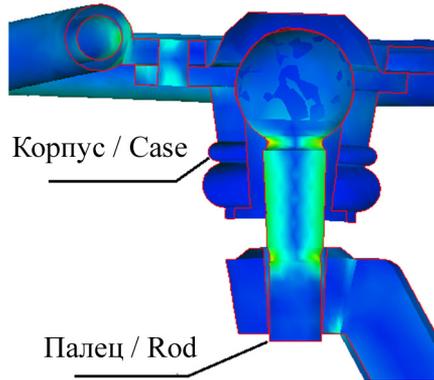
2. Контактные взаимодействия колеса с дорожным покрытием, а также пальца с корпусом в шаровом шарнире (рис. 4) носят сложный характер, требуют исключить возможность взаимного проникновения тел. В среде SolidWorks Motion силы контактного взаимодействия такого типа определяются приближенно посредством задания интегральных значений параметров жесткости и диссипации, а также численной оценки величин взаимного проникновения тел в процессе интегрирования уравнений движения.



Р и с. 3. Фотореалистическое изображение электромобиля (SolidWorks PhotoView)

F i g. 3. Photo realistic view for e-car (SolidWorks PhotoView)

⁸ Видеоролик № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1TVC7LJTLXyLNiyqPy08SyK1WJOUexJBM/view?usp=sharing> (дата обращения: 07.08.2020).

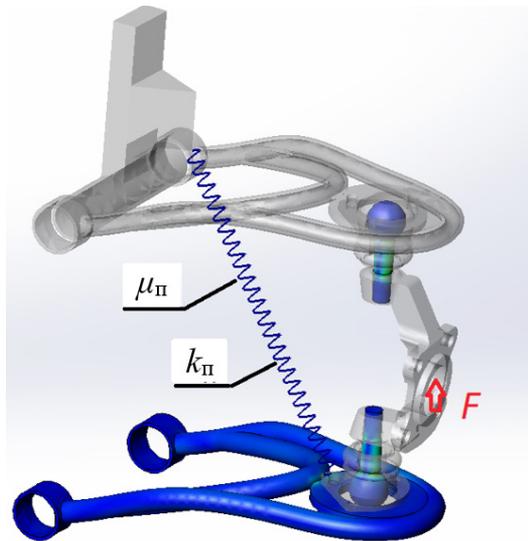


Р и с. 4. Контактная задача для пальца шарового шарнира
 F i g. 4. Contact problem for ball joint rod

3. «Точное» решение задачи предусматривает анализ сложного контактного взаимодействия твердых тел на микроуровне, учет больших перемещений, обусловленных наличием элементов малой жесткости (пружин), диссипации энергии. То есть в общем случае задача должна быть решена как фи-

зически и геометрически нелинейная задача динамики для деформируемого твердого тела.

На рисунке 5 представлены результаты решения нелинейной задачи анализа статической прочности для передней подвески в напряжениях по Мизесу. В качестве внешнего воздействия



Р и с. 5. Карта напряжений по Мизесу для статического анализа передней подвески в нелинейной постановке

F i g. 5. Von Mises stress map for front suspension system

рассматривается вертикальная сила F , распределенная по цилиндрической поверхности центрального отверстия, выходящего под вал колеса.

На рисунке 5 показаны наиболее напряженные детали: нижний рычаг и палец шаровой опоры для наиболее опасного положения. Видеоролик иллюстрирует развитие напряженно-деформированного состояния конструкции при постепенном возрастании силы от нуля до заданной⁹. Задача представляет интерес именно как инструмент «точного» определения картины качественного распределения и концентрации напряжений.

Следует отметить следующие особенности: выявленные концентраторы и картина распределения напряжений (рис. 5) соответствуют результатам других работ, определение точных значений напряжений требует решения нелинейной динамической задачи, еще более трудоемкой [8; 10–12]. В практике инженерных расчетов принято в таких случаях ограничиваться решением линеаризованных динамических задач.

SolidWorks Motion позволяет решить линеаризованную динамическую задачу для твердых тел в терминах механики деформируемого твердого тела в следующих двух вариантах.

1. Осуществить экспорт в конечно-элементный процессор (SolidWorks Simulation) внешних по отношению к детали сил, заданных как функции времени на интервале в контексте Motion. Такой подход имеет ряд неоспоримых преимуществ: удобство и простота использования интерфейса Motion; возможность наблюдать изменение динамических напряжений и деформированного состояния детали во времени непосредственно в процессе анимации движения сборки в окне SolidWorks Motion.

Недостатками данного подхода является то, что экспорт сил можно осуществить только для отдельной детали, находящейся на самом верхнем уровне сборки, а также ограниченные возможности формирования конечно-элементной сетки.

2. Второй вариант предусматривает стандартное формирование задачи конечно-элементного анализа с использованием полного спектра функционала и интерфейса Simulation непосредственно после экспорта сил взаимодействия из Motion в Simulation.

Приведем результаты анализа динамики и прочности электротрайка для задач в двух указанных постановках. Рисунок 6 иллюстрирует распределение напряжений по Мизесу для деталей передней подвески в процессе преодоления препятствия в наиболее опасном состоянии. Приведенные карты напряжений положены на шкалу времени и отображаются непосредственно в окне Motion.

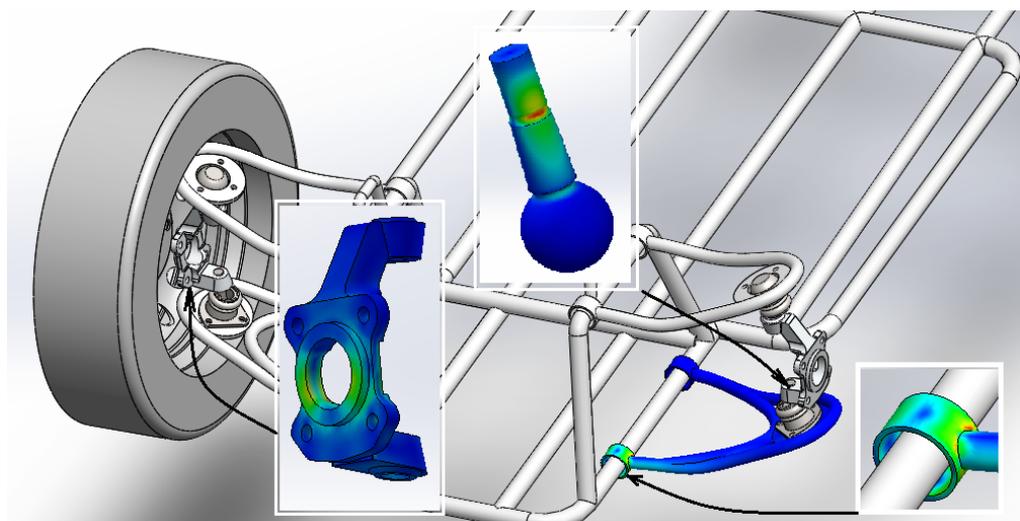
Аналогичные результаты (рис. 7) получены для нижнего рычага задней подвески.

Для создания конечно-элементной сетки верхнего рычага задней подвески и несущей рамы штатного функционала, доступного в Motion, оказалось недостаточно. Для рамы потребовалось использование инструментов управления сеткой, причем наиболее экономичный вариант реализуется для оболочечной модели. Результат в виде карты динамических напряжений по Мизесу для наиболее опасного состояния показан на рисунке 8.

Результаты исследования

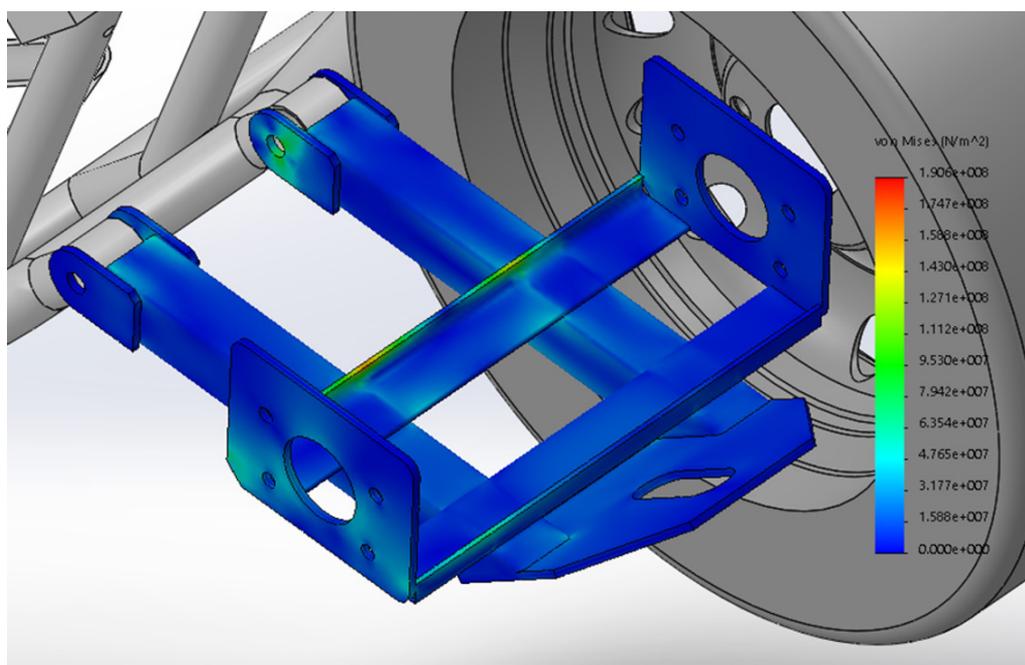
Разработанные CAD/CAE-модели были использованы в качестве объектов и инструментов вариационного проектирования. При этом преследовалась следующая цель: снизить материалоемкость конструкции при удовлетворении

⁹ Видеоролик № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://drive.google.com/file/d/1nzer-sruqOq9X-CFwQ9ZyIINCzym3zz1Z/view?usp=sharing> (дата обращения: 07.08.2020).



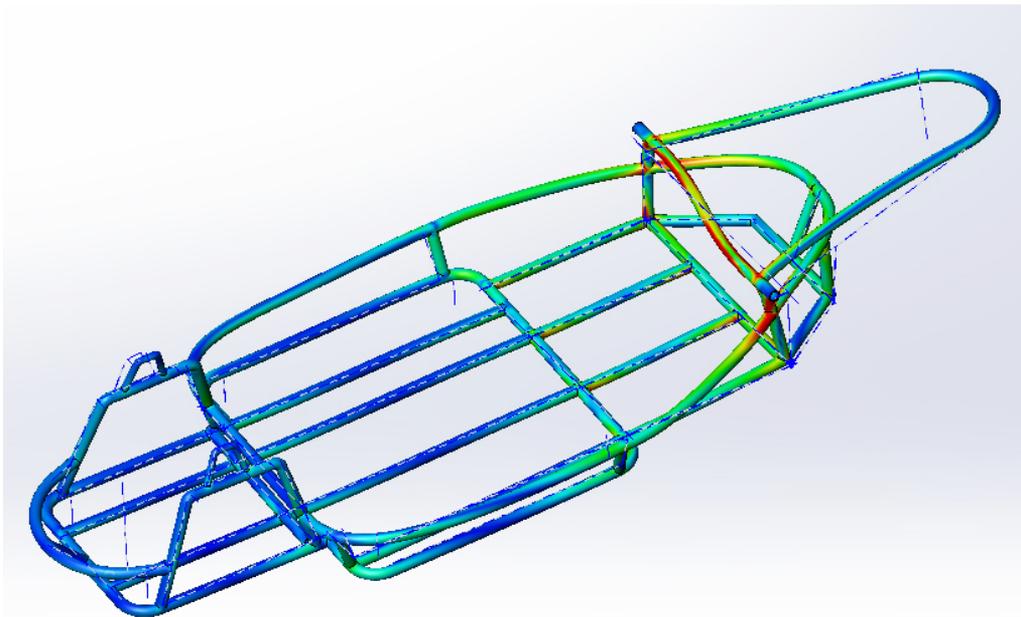
Р и с. 6. Карта динамических напряжений по Мизесу для конечно-элементного анализа деталей передней подвески в среде Motion

Fig. 6. Von Mises dynamics stress map for FEM analysis of the front suspension system parts by Motion software



Р и с. 7. Карта динамических напряжений по Мизесу для конечно-элементного анализа деталей нижнего рычага задней подвески в среде Motion

Fig. 7. Von Mises dynamics stress map for FEM analysis of the down arm for the rear suspension system part by Motion software



Р и с. 8. Карта динамических напряжений по Мизесу для конечно-элементного анализа несущей рамы в среде Simulation

F i g. 8. Von Mises dynamics stress map for FEM analysis of the chassis frame by Simulation software

условий прочности по динамическим напряжениям.

Исходная масса рассматриваемой части конструкции электромобиля (несущей рамы и подвесок) составляла 91 кг. В процессе вариантного проектирования (было рассмотрено 15 вариантов) масса конструкции была снижена на 12,5 %.

Ниже приведены результирующие значения глобальных переменных модели:

$$\begin{aligned} b_1 &= 700 \text{ мм}, b_2 = 420 \text{ мм}, b_3 = 600 \text{ мм}; \\ a_1 &= 43^\circ, a_2 = 26^\circ; \\ c_1 &= 400 \text{ мм}, c_2 = 400 \text{ мм}, c_3 = 1800 \text{ мм}; \\ h_1 &= 90 \text{ мм}, h_2 = 110 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Физико-механические параметры материала соответствуют малоуглеродистой стали. Снаряженная масса

электромобиля 400 кг. Скорость преодоления препятствия при виртуальных испытаниях 5 км/ч.

Максимальные динамические напряжения по Мизесу: в нижнем рычаге передней подвески $\sigma_{\text{min}} = 190$ МПа; в пальце шарового шарнира $\sigma_n = 155$ МПа; в нижнем рычаге задней подвески $\sigma_{\text{zn}} = 200$ МПа; в несущей раме $\sigma_p = 220$ МПа.

Обсуждение и заключение

Максимальные напряжения в несущей раме близки к пределу текучести, но носят при этом выраженный локальный характер. Варьирование переменных модели влечет за собой плохо предсказуемое перемещение концентратора напряжений в объеме конструкции. Необходимо провести дополнительное исследование с целью установить возможную сингулярность решения в напряжениях для конеч-

но-элементной модели рамы. В целом конструкция удовлетворяет условиям прочности по напряжениям.

В качестве перспектив работы следует указать: решение задачи параметрической оптимизации по массе

в строгой постановке; разработку интегрированной киберфизической модели для электромобиля, обеспечивающей решение задач анализа состояния и поведения конструкции, планирования траектории и управления движением.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Боровков, А. И.** Центр компетенций Национальной технологической инициативы «Новые производственные технологии» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого / А. И. Боровков, О. И. Рождественский, Ю. А. Рябов [и др.] // *Инновации*. – 2019. – № 11 (253). – С. 73–88. – URL: <https://maginnov.ru/ru/zhurnal/arhiv/2019/innovacii-n11-2019/centr-kompetencij-nacionalnoj-tehnologicheskoy-iniciativy-novye-proizvodstvennyye-tehnologii-sankt-peterburgskogo-politehnicheskogo-universiteta-petra-velikogo> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
2. **Левенцов, В. А.** Аспекты концепции «Индустрия 4.0» в части проектирования производственных процессов / В. А. Левенцов, А. Е. Радаев, Н. Н. Николаевский // *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки*. – 2017. – Т. 10, № 1. – С. 19–31. – URL: <https://institutiones.com/industry/2981-aspekty-koncepcii-industriya-4-0.html> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
3. **Agarwal, D.** A CAD Based Framework for Optimizing Performance While Ensuring Assembly Fit / D. Agarwal, T. T. Robinson, C. G. Armstrong // *ICSEE 2018, IMIOT 2018. Communications in Computer and Information Science*. – Singapore : Springer, 2018. – Vol. 923. – Pp. 73–83. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-13-2396-6_7 (дата обращения: 07.08.2020).
4. **Jung, M.** Integrated Framework for Vehicle Interior Design Using Digital Human Model / M. Jung, H. Cho, T. Roh [et al.]. – DOI 10.1007/S11390-009-9287-3 // *Journal of Computer Science and Technology*. – 2009. – Vol. 24. – Pp. 1149–1161. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11390-009-9287-3> (дата обращения: 07.08.2020).
5. **Бойков, В. Г.** Моделирование движения механической системы, состоящей из деформируемых упругих тел, путем интеграции двух пакетов: EULER и Fidesys / В. Г. Бойков, И. В. Гаганов, Ф. Р. Файзуллин [и др.] // *Чебышевский сборник*. – 2017. – Т. 18, № 3. – С. 131–153. – URL: <https://www.chebsbornik.ru/jour/article/view/352/317> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
6. **Горелов, В. А.** Исследование движения автомобиля в программном комплексе автоматизированного моделирования динамики систем тел / В. А. Горелов, А. И. Комиссаров, Б. Б. Косицын // *Журнал автомобильных инженеров*. – 2016. – № 1 (96). – С. 18–23. – URL: <http://www.aae-press.ru/f/96/18.pdf> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
7. **Савкин, А. Н.** Анализ эксплуатационной нагруженности рамы грузового автомобиля большой грузоподъемности / А. Н. Савкин, А. С. Горобцов, А. В. Андроник [и др.] // *Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: наземные транспортные системы*. – 2015. – Т. 11, № 5 (165). – С. 25–29. – URL: http://www.vstu.ru/files/vstu_periodical/4793/upload/no_5165_-2015.pdf (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
8. **Kravets, A.** Simulation and Visualization Software for Vehicle Dynamics Analysis Using Multibody System Approach / A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova [et al.] // *Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Communications in Computer and Information Science*. – Cham : Springer, 2015. – Vol. 535. – Pp. 378–390. – URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-23766-4_30.pdf (дата обращения: 07.08.2020).
9. **Hasagasioglu, S.** Vehicle Dynamics Analysis of a Heavy-Duty Commercial Vehicle by Using Multibody Simulation Methods / S. Hasagasioglu, K. Kilicaslan, O. Atabay [et al.]. – DOI 10.1007/s00170-011-3588-8 // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 60. – Pp. 825–839. – URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-011-3588-8.pdf> (дата обращения: 07.08.2020).

10. **Burcham, M. N.** Characterization and Failure Analysis of an Automotive Ball Joint / M. N. Burcham, R. Escobar, C. O. Yenusah [et al.]. – DOI 10.1007/s11668-017-0240-4 // Journal of Failure Analysis and Prevention. – 2017. – Vol. 17. – Pp. 262–274. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11668-017-0240-4#citeas> (дата обращения: 07.08.2020).
11. **Ambrosio, J.** Improved Bushing Models for General Multibody Systems and Vehicle Dynamics / J. Ambrosio, P. Verissimo. – DOI 10.1007/s11044-009-9161-7 // Multibody System Dynamics. – 2009. – Vol. 22. – Pp. 341–365. – URL <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11044-009-9161-7> (дата обращения: 07.08.2020).
12. **Vesali, F.** Dynamics of Universal Joints, Its Failures and Some Propositions for Practically Improving Its Performance and Life Expectancy / F. Vesali, M. A. Rezvani, M. Kashfi. – DOI 10.1007/s12206-012-0622-1 // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – Vol. 26, Issue 8. – Pp. 2439–2449. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12206-012-0622-1> (дата обращения: 07.08.2020).
13. **Barton, D. C.** Suspension Systems and Components / D. C. Barton, J. D. Fieldhouse. – DOI 10.1007/978-3-319-72437-9_3 // Automotive Chassis Engineering. – Cham : Springer, 2018. – Pp. 111–124. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-72437-9_3 (дата обращения: 07.08.2020).
14. **Borisenko, V.** K&C Suspension Parameters Stability by Production Tolerances / V. Borisenko, A. Kiselev, L. Leoro [et al.]. – DOI 10.1051/e3sconf/201914007007 // E3S Web of Conferences. – 2019. – Vol. 140. – 6 p. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2019/66/e3sconf_eece18_07007/e3sconf_eece18_07007.html (дата обращения: 07.08.2020).
15. **Jinturkar, A.** Weight Reduction of FSAE Vehicle Using TRIZ Principle / A. Jinturkar, R. Channa, R. Mistry [et al.] // ICoRD 2017: Research into Design for Communities, Vol. 1. – Singapore : Springer, 2017. – Pp. 861–870. – URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-10-3518-0_74 (дата обращения: 07.08.2020).
16. **Чугунов, М. В.** Анализ статической прочности и жесткости несущих элементов конструкции электромогиля BravoEgo / М. В. Чугунов, В. Н. Кекемайкин, М. В. Панин [и др.] // Наукоедение. – 2016. – Т. 8, № 3. – 22 с. – URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TVN316.pdf> (дата обращения: 07.08.2020). – Рез. англ.
17. **Daberkow, A.** An Integrated Approach for Computer Aided Design in Multibody System Dynamics / A. Daberkow, E. Kreuzer. – DOI 10.1007/s003660050011 // Engineering with Computers. – 1999. – Vol. 15. – Pp. 155–170. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs003660050011> (дата обращения: 07.08.2020).
18. **Bradley, J.** A Modelling Strategy for Vehicle Dynamics Using Pro/ENGINEER / J. Bradley, G. D. Tansley, J. Dominy. – DOI 10.1007/s12283-009-0017-4 // Sports Engineering. – 2009. – Vol. 11. – Pp. 119–129. – URL: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12283-009-0017-4> (дата обращения: 07.08.2020).
19. **Alekseev, S.** NVH Analysis of Offroad Vehicle Frame. Evaluation of Mutual Influence of Body-Frame System Components / S. Alekseev, A. Tarasov, A. Borovkov [et al.] // Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 34, no. 1. – Pp. 70–75.

Поступила 07.03.2020; принята к публикации 20.05.2020; опубликована онлайн 30.09.2020

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий кафедрой конструкторско-технологической информатики Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат технических наук, доцент, Researcher ID: H-7452-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент кафедры конструкторско-технологической информатики Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), кандидат педагогических наук, Researcher ID: H-7473-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

Пьянзин Антон Михайлович, студент 3 курса Рузаевского института машиностроения ФГБОУ ВО «МГУ им. Н. П. Огарёва» (430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, д. 68), a.m.pjanzin@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

М. В. Чугунов – разработка методологии исследования и построение моделей электромобилей; И. Н. Полунина – разработка методологии исследования и построение моделей электромобилей, численный анализ; А. М. Пьянзин – численный анализ.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Borovkov A.I., Rozhdestvenskiy O.I., Ryabov Yu.A., et al. National Technology Initiative Center for Advanced Manufacturing Technologies of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. *Innovatsii = Innovations*. 2019; (11):73-88. Available at: <https://maginnov.ru/ru/zhurnal/arhiv/2019/innovacii-n11-2019/centr-kompetencij-nacionalnoj-tehnologicheskoy-iniciativy-novye-proizvodstvennye-tehnologii-sankt-peterburgskogo-politehnicheskogo-universiteta-petra-velikogo> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

2. Leventsov V.A., Radaev A.E., Nikolaevskiy N.N. The Aspects of the “Industry 4.0” Concept within Production Process Design. *Nauchno-tekhicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki = St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Economics*. 2017; 10(1):19-31. Available at: <https://instituciones.com/industry/2981-aspekty-koncepcii-industriya-4-0.html> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

3. Agarwal D., Robinson T.T., Armstrong C.G. A CAD Based Framework for Optimizing Performance While Ensuring Assembly Fit. In: ICSEE 2018, IMIOT 2018. Communications in Computer and Information Science. Singapore: Springer; 2018. 923:73-83. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-13-2396-6_7 (accessed 07.08.2020). (In Eng.)

4. Jung M., Cho H., Roh T., et al. Integrated Framework for Vehicle Interior Design Using Digital Human Model. *Journal of Computer Science and Technology*. 2009; 24:1149-1161. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/S11390-009-9287-3>

5. Boikov V.G., Gaganov I.V., Fayzullin F.R. Modeling the Motion of a Mechanical System Consisting of Deformable Elastic Bodies, by Integrating Two Packages: EULER and FIDESYS. *Chebyshevskiy sbornik = Chebyshevskii Sbornik*. 2017; 18(3):131-153. Available at: <https://www.chebsbornik.ru/jour/article/view/352/317> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

6. Gorelov V.A., Komissarov A.I., Kositsyn B.B. Passenger Car Motion Modeling in a Multibody Dynamics Simulation Software. *Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov = Automotive Engineers' Journal*. 2016; (1):18-23. Available at: <http://www.aae-press.ru/f/96/18.pdf> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

7. Savkin A.N., Gorobtsov A.S., Andronik A.V., et al. Operating Load Analysis of Heavy Duty Truck Frame. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: nazemnye transportnye sistemy = Volgograd State Technical University News. Series: Ground Transport Systems*. 2015; 11(5):25-29. Available at: http://www.vstu.ru/files/vstu_periodical/4793/upload/no_5165_-_2015.pdf (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

8. Kravets A., Shcherbakov M., Kultsova M., et al. Simulation and Visualization Software for Vehicle Dynamics Analysis Using Multibody System Approach. In: Creativity in Intelligent Technologies and Data Science. Communications in Computer and Information Science. Cham: Springer; 2015. 535:378-390. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-23766-4_30 (accessed 07.08.2020). (In Russ.)

9. Hasagasioglu S., Kilicaslan K., Atabay O., et al. Vehicle Dynamics Analysis of a Heavy-Duty Commercial Vehicle by Using Multibody Simulation Methods. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012; 60:825-839. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3588-8>

10. Burcham M.N., Escobar R., Yenusah C.O., et al. Characterization and Failure Analysis of an Automotive Ball Joint. *Journal of Failure Analysis and Prevention*. 2017; 17:262-274. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11668-017-0240-4>

11. Ambrosio J., Verissimo P. Improved Bushing Models for General Multibody Systems and Vehicle Dynamics. *Multibody System Dynamics*. 2009; 22:341-365. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s11044-009-9161-7>
12. Vesali F., Rezvani M.A., Kashfi M. Dynamics of Universal Joints, Its Failures and Some Propositions for Practically Improving Its Performance and Life Expectancy. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012; 26(8):2439-2449. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0622-1>
13. Barton D.C., Fieldhouse J.D. Suspension Systems and Components. In: *Automotive Chassis Engineering*. Cham: Springer; 2018. Pp. 111-124. (In Eng.) DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-72437-9_3
14. Borisenko V., Kiselev A., Leoro L., et al. K&C Suspension Parameters Stability by Production Tolerances. *E3S Web of Conferences*. 2019; 140. 6 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3s-conf/201914007007>
15. Jinturkar A., Channa R., Mistry R., et al. Weight Reduction of FSAE Vehicle Using TRIZ Principle. In: *ICoRD 2017: Research into Design for Communities*, Vol. 1. Singapore: Springer; 2017. Pp. 861-870. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-981-10-3518-0_74 (accessed 07.08.2020). (In Eng.)
16. Chugunov M.V., Kechemaykin V.N., Panin M.V., et al. Static Strength and Stiffness Analysis for Bearing Structure Elements of Electro Car BravoEgo. *Naukovedenie = Sociology of Science*. 2016; 8(3). 22 p. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/134TVN316.pdf> (accessed 07.08.2020). (In Russ.)
17. Daberkow A., Kreuzer E. An Integrated Approach for Computer Aided Design in Multibody System Dynamics. *Engineering with Computers*. 1999; 15:155-170. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s003660050011>
18. Bradley J., Tansley G.D., Dominy J. A Modelling Strategy for Vehicle Dynamics Using Pro/ENGINEER. *Sports Engineering*. 2009; 11:119-129. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1007/s12283-009-0017-4>
19. Alekseev S., Tarasov A., Borovkov A., et al. NVH Analysis of Offroad Vehicle Frame. Evaluation of Mutual Influence of Body-Frame System Components. *Materials Physics and Mechanics*. 2017; 34(1):70-75. (In Eng.)

Received 07.03.2020; revised 20.05.2020; published online 30.09.2020

About the authors:

Mikhail V. Chugunov, Head of Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Researcher ID: H-7452-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Irina N. Polunina, Associate Professor of Chair of Design and Technology Informatics of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), Ph.D. (Pedagogy), Researcher ID: H-7473-2018, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

Anton M. Pjanzin, Student of Ruzaevka Institute of Mechanical Engineering, National Research Mordovia State University (68 Bolshevistskaya St., Saransk 430005, Russia), a.m.pyanzin@mail.ru

Contribution of the authors:

M. V. Chugunov – research methodology development and model building for electric vehicles; I. N. Polunina – development of research methodology and model building for electric vehicles, numerical analysis; A. M. Pjanzin – numerical analysis.

All authors have read and approved the final manuscript.