

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ  
УДК 656.257-83:551.46  
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-3>

## Автоматизация управления электроприводом обитаемого подводного аппарата



Александр ПЕТРУШИН



Владислав СМАЧНЫЙ



Владимир ЛОБЫНЦЕВ



Сергей ФОКИН

*Александр Дмитриевич Петрушин<sup>1</sup>, Владислав Юрьевич Смачный<sup>2</sup>,  
Владимир Васильевич Лобынцев<sup>3</sup>, Сергей Георгиевич Фокин<sup>4</sup>*

<sup>1, 2</sup> Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия.

<sup>3</sup> Российский университет транспорта, Москва, Россия.

<sup>4</sup> Центр подводных исследований Русского географического общества, Санкт-Петербург, Россия.

✉ <sup>1</sup>alex331685@yandex.ru, <sup>2</sup>smachney87@mail.ru, <sup>3</sup>Lobzik-v@yandex.ru, <sup>4</sup>s.fokin@urc-rgs.ru.

### АННОТАЦИЯ

В настоящее время происходит интенсивное развитие обитаемых и необитаемых подводных аппаратов благодаря освоению шельфовых нефтегазовых месторождений, развитию подводной археологии и геологоразведочной деятельности в транзитных зонах относительно добычи полезных ископаемых с морского дна. Глубина погружения и характер выполняемых подводно-технических работ определяют не только конструктивное исполнение подводного аппарата, его энерговооруженность и техническую оснащенность, но и предъявляют высокие требования по надёжности, живучести и обитаемости в случае, если подводный аппарат подразумевает нахождение оператора на борту внутри прочного корпуса. Основные цели проведённого авторами исследования – это достижение высоких показателей надёжности и живучести основных элементов движительно-рулевого комплекса, обеспечивающих движение обитаемого подводного аппарата в толще воды, его позиционирование и удержание в заданной точке акватории.

Для этого была проведена разработка автоматизированной системы управления электроприводом движителей обитаемого подводного аппарата. Предложена блок-схема системы управления движением, разработаны схемотехнические решения с использованием силовых полупроводниковых приборов для поддержания работоспособ-

ности электропривода в экстремальных и аварийных условиях эксплуатации, разработаны алгоритмы управления движением. Электромагнитные расчёты активной части электрической машины выполнены методом конечных элементов с учётом геометрических особенностей зубцовой зоны ротора и статора. На основе предложенного математического аппарата рассчитаны оптимальные управляющие воздействия электроприводом и дана количественная оценка по снижению электрических потерь при оптимальном управлении. Расчёт оптимальных параметров управления осуществляется с помощью принципа максимума. Начальные условия для вспомогательных функций определены методом Ньютона-Рафсона. Проведено сравнение различных режимов работы электропривода с их влиянием на продолжительность кампании и другие показатели.

В проведённых расчётах не учитывались параметры и геометрия движителя – гребного винта, потому как разработчики систем электродвижения обитаемых и необитаемых подводных аппаратов различного класса часто намеренно идут на снижение коэффициента полезного действия винта в угоду увеличению частоты вращения вала электродвигателя, следствием чего является снижение габаритов и массы последнего.

**Ключевые слова:** автоматизированная система управления, обитаемый подводный аппарат, надёжность, энергоэффективность, оптимизация, отказоустойчивость.

**Для цитирования:** Петрушин А. Д., Смачный В. Ю., Лобынцев В. В., Фокин С. Г. Автоматизация управления электроприводом обитаемого подводного аппарата // Мир транспорта. 2021. Т. 19. № 6 (97). С. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-6-3>.

**Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.**

## ВВЕДЕНИЕ

Интеллектуальные информационные технологии с функциями автоматизированного управления являются обязательным атрибутом в специализированной транспортной технике при производстве работ в чужеродных для жизнедеятельности человека средах, в том числе под водой. Высокая степень риска выполнения подводно-технических работ предъявляет исключительную требовательность к надёжности узлов, деталей и систем, живучести обитаемого подводного аппарата (ОПА) в целом.

При наличии определённых успехов в проектировании и создании отечественных ОПА на различные глубины погружения с объективной доминантой электротехнической компоненты, остаётся комплекс вопросов по увеличению энергоэффективности с продлением длительности кампании, оптимизации стоимости изготовления, обеспечению конкурентоспособности на мировом рынке.

### Актуальность и анализ состояния проблемы

Стремление к исследованию мирового океана привело к созданию двух ОПА, единой погрузившихся в наиболее глубоком месте Марианского жёлоба – бездне Челленджера: батискафа «Trieste» и глубоководного аппарата «Deepsea Challenger», рассчитанных на максимальную глубину в 11000 м [1]. Проведение подводно-технических работ по обследованию состояния, ремонту и восстановлению различных объектов, расположенных на морском дне и вблизи него, предполагает использование глубоководной техники, в том числе обитаемых подводных аппаратов (ОПА)<sup>1</sup>.

В рамках проведения IX Петербургского международного газового форума на выставочной экспозиции «Наука и инновации» ПАО «Газпром» вниманию публики был представлен отечественный ОПА проекта 03660 с прозрачным сферическим прочным корпусом, предназначенный для выполнения подводно-технических работ на морских магистральных газопроводах. Проект реализуется ПАО «Газпром» с привлечением НИЦ «Курчатовский институт», Санкт-Петер-

<sup>1</sup> На дно океана: топ-5 российских глубоководных аппаратов. [Электронный ресурс]: <https://tvzvezda.ru/news/201707121549-v8fk.htm>. Доступ 22.08.2021.

бургского морского бюро машиностроения «Малахит» и Центра подводных исследований Русского географического общества<sup>2</sup>.

Движение в толще воды, удержание на месте и маневрирование ОПА обеспечивает движительно-рулевой комплекс из двух маршевых, двух вертикальных и одной горизонтальной подруливающих колонок. В современной практике разработчики подводных аппаратов часто прибегают к снижению КПД винта за счёт увеличения частоты вращения вала двигателя в целях оптимизации его габаритов и массы для достижения требуемых параметров обтекания при заданной величине тягового усилия. В связи с этим, несмотря на развитие водомётных систем, способных наделять ОПА большей манёвренностью, в силу разного рода причин основным эффективным видом движителей продолжают оставаться винты [2].

В качестве привода движителей в зависимости от требований к эксплуатации могут применяться: электродвигатели постоянного тока, асинхронные и синхронные электрические машины, в том числе с использованием постоянных магнитов в роторе традиционной компоновки и кольцевого типа, сухого или маслonaполненного исполнения с системой компенсации забортного давления; реже – электродвигатели открытого типа и гидромоторы. Электродвигатели переменного тока не имеют коллекторов, позволяя плавно регулировать частоту вращения вала, но требуют относительно более сложной системы управления. При этом эксплуатационные характеристики и эффективность ОПА непосредственно зависят от параметров привода движителя<sup>3</sup>.

### Постановка задачи и методы исследования

На рис. 1 представлена блок-схема системы автоматизированного управления движительно-рулевым комплексом ОПА, призванная повысить его надёжность, живучесть и улучшить динамические характеристики. Диалоговые органы дистанционного управ-

<sup>2</sup> Отечественный обитаемый подводный аппарат. [Электронный ресурс]: <https://urc-rgs.ru/activity/project?id=9>. Доступ 22.08.2021.

<sup>3</sup> Отечественные движители для подводных аппаратов. Материал из журнала «www.Korabel.ru». [Электронный ресурс]: [https://www.korabel.ru/news/comments/otechestvennye\\_dvizhiteli\\_dlya\\_podvodnyh\\_apparatov.html](https://www.korabel.ru/news/comments/otechestvennye_dvizhiteli_dlya_podvodnyh_apparatov.html). Доступ 22.08.2021.





Рис. 1. Блок-схема системы управления движением ОПА [выполнено авторами].

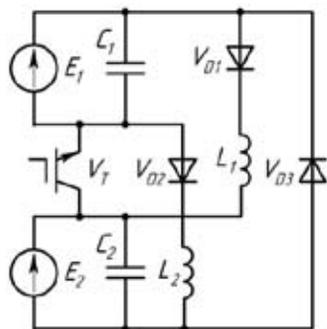


Рис. 2. Силовой контур одной фазы SRM [выполнено авторами].

ления посредством прямых и обратных связей позволяют задавать, контролировать и оперативно корректировать параметры движения путём воздействия на микропроцессорную систему с автоматической визуализацией отклика. Микропроцессорная система обеспечивает связь со всеми элементами электропривода, реализуя в автоматическом режиме выход на заданные параметры движения или позиционирования в заданной точке с оптимизацией алгоритмов управления, совокупно выполняет диагностические, защитные и информационные функции.

В качестве прототипа электропривода рассмотрен Switched Reluctance Motor (SRM). Эта электрическая машина благодаря ряду положительных качеств находит применение на различных транспортных средствах [3–5]. Обладая простотой конструкции и надёжностью, SRM имеет высокое значение КПД, что важно для анализа длительности кампании, времени хода на марше и дальности плавания на расчётной глубине погружения.

Для обеспечения высокого уровня живучести движительно-рулевого комплекса силовые контуры системы управления электроприводом, соединяющие фазы электрической

машины с источником питания, должны быть реализованы с использованием гальванической развязки. Источник питания секционирован, независимая секция работает на отдельную фазу SRM. При такой структуре силовой части выход из строя любого элемента: обмотки, полупроводникового компонента, секции источника питания не приводит к взаимосвязанным отказам и не влияет на работоспособность остальных фаз электропривода, а повреждённый узел движительно-рулевого комплекса сохраняет живучесть с частичной потерей мощности. В таком случае силовой контур питания одной фазы SRM (рис. 2) будет иметь один полупроводниковый ключ  $V_T$ , обеспечивающий возможность формирования двух контуров подводящего к обмотке напряжения: положительного с поступлением энергии в электромагнитный контур и отрицательного с возвратом энергии в источник по завершении цикла коммутации [6].

На рис. 3 представлена спроектированная авторами публикации активная часть SRM, оптимизированная при помощи метода Монте-Карло по критерию максимума электромагнитного момента в заданном геометрическом объёме с размещением всех элементов электродвигателя и учётом его наружного исполнения. Зубцовая зона SRM сформирована с использованием средств оптимального проектирования при криволинейной форме воздушного зазора между статором и ротором [7]. Зубцовая зона выбрана из соотношения десяти зубцов статора и восьми зубцов ротора [8]. При такой конструкции магнитопровода зубцы ротора разделены на зубцовые фрагменты, а угол между осями зубцов ротора в каждом фрагменте равен углу между осями всех равномерно распределённых зубцов статора. Зубцы статора с размещёнными

ми на них катушками равномерно распределены по внутренней поверхности статора.

В проведённом исследовании была поставлена задача обеспечения энергоэффективности работы SRM путём управления электрической машиной по оптимальному алгоритму, который позволяет существенно снизить электрические потери в обмотке при электромеханическом преобразовании энергии.

Расчёты проведены для электрической машины с номинальной мощностью 5 кВт и частотой вращения  $500 \text{ с}^{-1}$ , момент инерции ротора и присоединённых к нему вращающихся частей  $0,25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ , напряжение питания 220 В для варианта питания прямоугольными импульсами напряжения и 400 В для питания обмоток при оптимальном управлении.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

### Теоретическая часть

Математическая модель SRM составлена при допущении, что магнитная связь между фазами отсутствует. Уравнения Кирхгофа электрической цепи для первой фазы обмотки имеет вид [9]:

$$V = R_s i_1 + \frac{d\psi_1(\theta, i_1)}{dt}, \quad (1)$$

где  $V$  – напряжение питания фазы, В;

$i_1$  – ток первой фазы, А;

$R_s$  – активное сопротивление каждой фазы, Ом;

$\Psi_1(\theta, i)$  – потокосцепление первой фазы, зависящее от угла поворота ротора  $\theta$ , эл. град., и тока  $i$ ;

$t$  – время, с.

Уравнение (1), выраженное через параметры SRM и приведённое к форме Коши, представлено в следующем виде:

$$\frac{di_1}{d\theta} = \frac{1}{\omega \cdot Z_r \cdot L_1} \cdot (V - i_1 R_s - i_1 \cdot \omega \cdot Z_r \cdot \frac{dL_1}{d\theta}), \quad (2)$$

где  $\omega$  – угловая частота вращения,  $\text{с}^{-1}$ ;

$Z_r$  – количество зубцов ротора.

Уравнение движения представлено в виде:

$$\frac{d\omega}{d\theta} = \frac{1}{J \cdot \omega \cdot Z_r} (T_e - T_r), \quad (3)$$

где  $n$  – число фаз SRM;

$J$  – момент инерции,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2$ ;

$T_m$  – электромагнитный момент, Н•м;

$T_r$  – момент сопротивления на валу, Н•м.

Для определения оптимальных управляющих воздействий SRM был использован принцип максимума. В качестве критерия

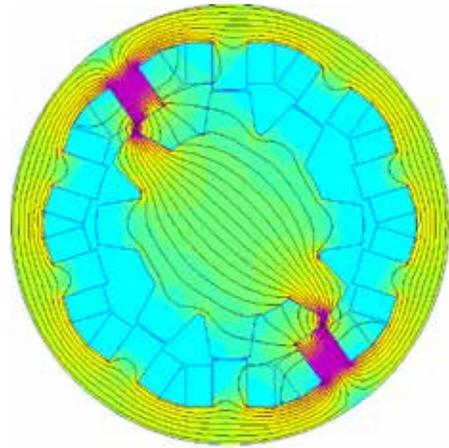


Рис. 3. Активная часть SRM с возбуждённой одной фазой [выполнено авторами].

оптимизации выбран квадрат подводимого напряжения к обмотке статора [10]:

$$J_k = \int_{\theta_1}^{\theta_2} V^2 d\theta. \quad (4)$$

Для линейных электрических цепей критерий (4) позволяет получить минимальные электрические потери. Однако SRM работает с периодическим насыщением магнитопровода, имеющего нелинейную кривую намагничивания, поэтому критерий (4) не будет соответствовать минимуму электрических потерь, но, как показали расчёты, позволит существенно их снизить.

Зависимость питающего напряжения от угла поворота ротора выбрана в качестве управляющего воздействия [11]. На стадии оптимизации приняты следующие допущения: зависимость индуктивности от угла поворота ротора аппроксимирована гармонической функцией, насыщение магнитопровода не учитывалось, тогда промежуточная функция  $H$  согласно принципу максимума имеет следующий вид:

$$H = \left[ \frac{1}{\omega \cdot Z_r \cdot L_1} \cdot (V - i_1 R_s - i_1 \cdot \omega \cdot Z_r \cdot \frac{dL_1}{d\theta}) \right] \Psi_1 + \left[ \frac{1}{J \cdot \omega \cdot Z_r} \cdot \left( \sum_1^n \frac{Z_r \cdot i_1^2}{2} \cdot \frac{dL_i}{d\theta} - T_r \right) \right] \Psi_2 + V^2.$$

Определим оптимальное напряжение питания  $V^*$  как частную производную от промежуточной функции по управляющему воздействию  $V$ :

$$V^* = \frac{\Psi_1}{2 \cdot L \cdot \omega \cdot Z_r}. \quad (5)$$

Определим вспомогательные функции  $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ :



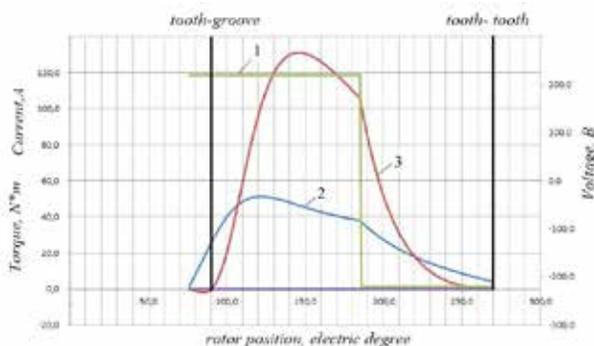


Рис. 4. Параметры фазы SRM при питании импульсами постоянного тока: 1 – напряжение питания, 2 – ток, 3 – электромагнитный момент [выполнено авторами].

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{d\theta} = \psi_1 \left( \frac{R_s}{L \cdot \omega \cdot Z_r} + \frac{1}{L} \cdot \frac{dL}{d\theta} \right) - \frac{i_1 \cdot \psi_2}{J \cdot \omega} \cdot \frac{dL}{d\theta} \\ \frac{d\psi_2}{d\theta} = \frac{\psi_1}{L \cdot \omega^2} (V - i_1 R_s) + \frac{\psi_2}{J \cdot \omega^2} \left( \frac{i_1^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\theta} - T_R \right). \end{cases} \quad (6)$$

При решении задачи оптимизации начальные условия для вспомогательных функций определены при помощи метода Ньютона–Рафсона [12].

Результаты расчёта для управления SRM без использования алгоритма оптимизации для одной фазы обмотки статора приведены на рис. 4.

Импульсы постоянного напряжения амплитудой 220 В подавались при следующих углах управления: угол включения 15 эл. град. до положения зубец–паз и угол отключения 85 эл. град. до положения зубец–зубец.

Результаты расчёта при управлении SRM с использованием алгоритма оптимизации, при условии равной производительности с вариантом без оптимизации, приведены на рис. 5.

В оптимальном режиме ток обмотки статора SRM в отличие от режима без оптимизации не имеет явно выраженного максимума (рис. 5), а имеет пологую характеристику в диапазоне 135–185 эл. град. В оптимальном режиме при выполнении одной и той же работы электрические потери в обмотке снизились. Если электрические потери за один такт коммутации в режиме без оптимизации принять за 100 %, то в оптимальном режиме электрические потери будут на 6–7 % меньше.

Для реализации оптимального режима следует увеличить напряжение питания SRM при уменьшении ёмкости аккумуляторов из

расчёта, чтобы пространство для размещения аккумуляторных батарей осталось прежним.

### Практическая значимость

Практическая реализация оптимального алгоритма управления SRM достигается с помощью программы управления микроконтроллером, которая формирует в реальном масштабе времени параметры задающих импульсов по математической модели оптимального регулирования SRM. Ток в обмотке формируется помощью широтно-импульсной модуляции (Pulse-Width Modulation, PWM). Качество формы питающего тока при оптимальном управлении SRM обеспечивается рациональным выбором параметров PWM.

Практическая значимость полученных результатов заключается в увеличении надёжности, живучести и энергоэффективности SRM электропривода движительно-рулевого комплекса, повышении качества функционирования предложенной автоматизированной системы управления движением ОПА, являющихся определяющими в эксплуатационной привлекательности и достижении конкурентоспособности на мировом рынке.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная автоматизированная система управления электроприводом движительно-рулевого комплекса ОПА позволяет повысить надёжность и живучесть аппарата в целом. Использование гальванически развязанных силовых контуров, соединяющих фазы электрической машины с источником питания, дополнительно обеспечивают отказоустойчивость и работу в аварийном режиме при снижении мощности на валу.

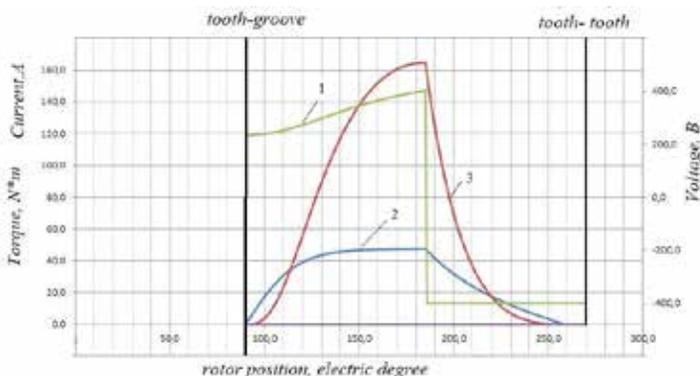


Рис. 5. Параметры фазы SRM при оптимальном алгоритме управления:  
1 – напряжение питания, 2 – ток, 3 – электромагнитный момент [выполнено авторами].

Разработанный математический аппарат и проведённые с его использованием количественные оценки энергетической эффективности положительным образом отразились на возможности оптимизации потребления электроэнергии от бортового источника питания. Уменьшение электрических потерь при электромеханическом преобразовании энергии непосредственно влияет на дальность хода ОПА и длительность кампании.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Григорьев А. И., Литвиненко В. В., Лапсарь С. А. Перспективные технологии глубоководных аппаратов на примере создания АНПА «Витязь» // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук, Санкт-Петербург. – 2020. – № 4. – С. 117–122. [Электронный ресурс]: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44392933>. Доступ 22.08.2021.
2. Двигательно-рулевой комплекс подводного аппарата: Морской энциклопедический словарь в двух томах / Под ред. акад. Н. Н. Исанина. Том 1. [Электронный ресурс]: <https://www.korabel.ru/dictionary/detail/409.html>. Доступ 22.08.2021.
3. Kamalakannan, C., Kamaraj, V., Paramasivam, S., Paranjothi, S. Switched reluctance machine in automotive applications – A technology status review. In: Proceedings of the 2011 1<sup>st</sup> International Conference on Electrical Energy Systems, Newport Beach (USA), 2011, pp. 187–197. DOI: 10.1109/ICEES.2011.5725326.
4. Voron, Oleg A., Petrushin, Alexandr D. Improving the Energy Efficiency of Electric Machines for Specialized Railway Rolling Stock. In: 2021 XVIII International Scientific Technical Conference Alternating Current Electric Drives (ACED), Ekaterinburg, Russia. DOI: 10.1109/ACED50605.2021.9462273.
5. Nuca, I., Todos, P., Esanu, V. Urban electric vehicles traction: Achievements and trends. In: Proceedings of the 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE '2012), Iasi (Romania), 2012, pp. 76–81. DOI: 10.1109/ICEPE.2012.6463948.
6. Petrushin, A., Smachney, V., Petrushin, D. Research of options for maintaining the operability of the traction switched reluctance motors in emergencies. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2020, Vol. 950, Iss. 1, pp. 012028. DOI: 10.1088/1757-899X/950/1/012028.
7. Petrushin, A. D., Kashuba, A. V. Improvement of switched reluctance motor performance using optimization algorithms. In: Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS 2018), Novocheerkassk, October 3–6, 2018, pp. 4–7. DOI: 10.1109/ICEPDS.2018.8571756.
8. Пат. № 2629753 Российская Федерация, МПК H02K 19/06. Вентильно-индукторная электрическая машина / Петрушин А. Д., Петрушин Д. А., Чавычалов М. В.; заявители и патентообладатели. – № 2016102297; заявл. 25.01.2016; опубл. 26.07.2017, бюл. № 21. [Электронный ресурс]: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2629753C2\\_20170901](https://yandex.ru/patents/doc/RU2629753C2_20170901). Доступ 22.08.2021.
9. Krishnan, R. Switched Reluctance Motor Drives Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications. London, CRC press, 2001, 432 p. DOI: 10.1201/9781420041644.
10. Petrushin, A. D., Kashuba, A. V., Petrushin, D. A. Using Optimization Algorithms in the Design of SRM. Modelling and Control of Switched Reluctance Machines. Ed. by Rui Esteves Araújo. London, IntechOpen, 2020, 24 p. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89123/>.
11. Hamouda, M., Menaem, A. A., Rezk, H., Ibrahim, M. N. Comparative Evaluation for an Improved Direct Instantaneous Torque Control Strategy of Switched Reluctance Motor Drives for Electric Vehicles. Mathematics, 2021, Vol. 9, Iss. 4. DOI: 10.3390/math9040302.
12. Casella, F., Bachmann, B. On the choice of initial guesses for the Newton–Raphson algorithm. Applied Mathematics and Computation, 2021, Vol. 398, pp. 125991. DOI: 10.1016/j.amc.2021.125991.

### Информация об авторах:

**Петрушин Александр Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор кафедры вагонов и вагонного хозяйства Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, [alex331685@yandex.ru](mailto:alex331685@yandex.ru).

**Смачный Владислав Юрьевич** – ассистент кафедры технологии металлов, начальник отдела трудоустройства и мониторинга карьеры Ростовского государственного университета путей сообщения (РГУПС), Ростов-на-Дону, Россия, [smachney87@mail.ru](mailto:smachney87@mail.ru).

**Лобынцев Владимир Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электроэнергетики транспорта Российского университета транспорта, Москва, Россия, [Lobzik-v@yandex.ru](mailto:Lobzik-v@yandex.ru).

**Фокин Сергей Георгиевич** – Исполнительный директор Центра подводных исследований Русского географического общества, Санкт-Петербург, Россия, [s.fokin@irc-rgs.ru](mailto:s.fokin@irc-rgs.ru).

Статья поступила в редакцию 16.09.2021, одобрена после рецензирования 05.12.2021, принята к публикации 19.12.2021.

