

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Б. А. Авдеев, С. Г. Черный,  
А. С. Кустов, А. В. Дегтярев

*Увеличение эффективности работы комплекса «аккумуляторная батарея – преобразователь – гребной электропривод» является первоочередным фактором в увеличении автономности работы и полезной нагрузки автономных подводных аппаратов. Рассмотрена имитационная модель в приложении Simulink пакета программ MATLAB электроэнергетической системы автономного подводного аппарата на базе твердотельного трансформатора. Определены показатели качества работы. Проанализирована работа системы и выявлены недостатки, такие как заброс тока при пуске и броски напряжения при переключении режима работы преобразователя. Определены пути понижения массогабаритных показателей и повышения эффективности.*

*Ключевые слова:* автономный подводный аппарат, твердотельный трансформатор, мостовой преобразователь, двигатель постоянного тока, регулятор.

### Введение

Подводный аппарат – техническое средство для обследования или проведения различных работ под водой. До относительно недавнего времени автономные подводные аппараты (АПА) использовались для ограниченного числа задач, продиктованных имеющимися технологиями. С развитием более совершенных вычислительных возможностей и высокопроизводительных источников питания АПА стали применяться для решения все большего и большего количества задач, при этом роли и миссии постоянно меняются. Подводные аппараты применяются для поиска, обследования подводных объектов, а также для спасательных, судоподъемных или других технических работ, где использование человека экономически нецелесообразно или является проблемным или опасным для жизни последнего [1]. АПА могут нести на борту разнообразную аппаратуру, необходимую для выполнения различных работ. Существует большое разнообразие конструкций АПА в зависимости от назначения, автономности, глубины и компании изготовителя. Время автономной работы АПА варьируется от нескольких часов до нескольких десятков часов. Связь с АПА во время миссии очень ограничена из-за очень низких скоростей акустических модемов [2]. Таким образом, собранные данные становятся доступными только тогда, когда робот возвращается на поверхность (либо путем извлечения робота, либо по радиосвязи). АПА питаются от аккумуляторов. Как правило, они приводятся в движение одним или несколькими винтовыми движителями. Одной из самых сложных проблем в процессе создания АПА является обеспечение необходимой автономности при сохранении малых массогабаритных показателей и низких экономических затрат на изготовление и работу.

**Постановка задачи.** Одним из важнейших параметров АПА является автономность, которая зависит

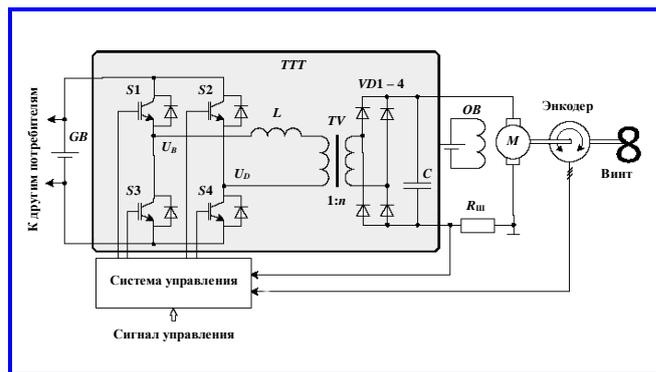
от качества и количества установленных в нём аккумуляторных батарей и от количества потребляемой мощности со стороны приёмников электроэнергии. Уменьшить количество или увеличить коэффициент полезного действия электроприёмников не всегда представляется возможным, поэтому обычно повышают мощность аккумуляторных батарей. Однако полезная нагрузка также ограничена объемами подводного аппарата. Путём решения этой дилеммы является уменьшение массы и габаритов оборудования, среди которого гребной электропривод занимает существенную часть. Поэтому вопрос, касающийся эффективного преобразования электроэнергии в АПА при минимально занимаемом объеме и весе, является актуальным и целесообразным.

В [3 – 9] приведён анализ электроэнергетических систем АПА как постоянного, так и переменного токов. Ранее исследовался гребной электродвигатель с неизолированным преобразователем, который продемонстрировал неплохие показатели [10 – 12]. Несмотря на двухконтурное управление и ограничения по напряжению, данный преобразователь имеет большие пульсации токов и напряжений, вызванные большой разницей между напряжением аккумуляторных батарей и электродвигателем. Чтобы решить эту проблему, необходимо обратиться к опыту береговых распределенных сетей, которые успешно согласуют цепи с различными уровнями постоянного напряжения. Таким устройством является твердотельный трансформатор. Благодаря своим уменьшенным массогабаритным показателям, высокой эффективности работы с нагрузкой постоянного тока и возможности поддерживать выходное напряжение при колебаниях нагрузки и разряжающейся аккумуляторной батарее он считается перспективным и самым многообещающим преобразователем для мобильной техники [13, 14].

**Материалы и методы.** В качестве метода исследования применено имитационное моделирование в пакете программ *MATLAB (Simulink)*. В научных публикациях уделяется недостаточно внимания совершенствованию электроэнергетической системы АПА. В статьях [15 – 19] описываются принципы моделирования силовых агрегатов и систем управления в среде моделирования *Simulink* и *Multisim*, однако они не в состоянии охватить столь сложный и многогранный материал. Данная статья является продолжением темы, начатой в серии публикаций [10 – 12], посвящённой совмещению системы управления гребным электроприводом постоянного тока и преобразователем напряжения от аккумуляторных батарей.

Использование прямого электропривода позволяет улучшить массогабаритные характеристики АПА в целом. В качестве электродвигателя может быть использован двигатель постоянного, переменного тока или двигатель на постоянных магнитах. В статье рассмотрен способ управления гребным электродвигателем постоянного тока (ДПТ). Выбор его обусловлен тем фактом, что для двигателя переменного тока необходимо ставить дополнительно инвертор, что усложнит установку и создаст дополнительные потери в силовых транзисторах. Также увеличение количества силовых элементов, по которым протекает ток, приведёт к увеличению мощности системы охлаждения, что в ограниченном пространстве АПА добиться проблематично. Функциональная схема гребного электропривода АПА представлена на рис. 1.

Питание двигателя *M* осуществляется от аккумуляторной батареи *GB* через основной элемент *ТТТ* – однонаправленный изолированный преобразователь постоянного напряжения (мостовой преобразователь постоянного тока). Преобразователь состоит из инверторного моста, собранного из IGBT-транзисторов *S1* – *S4*, высокочастотного трансформатора *TV* и выходного диодного выпрямительного моста на базе диодов *VD1* – 4. Активный инверторный мост преобразует постоянное напряжение в высокочастотное переменное, которое повышается в трансформаторе и снова выпрямляется. С целью обеспечить более мягкую коммутацию и уменьшить пульсации тока предусмотрена катушка *L*. Для сглаживания пульсаций напряжения, подаваемого на ДПТ, имеется сглаживающий конденсатор *C*. Для контроля частоты вращения на валу ДПТ должен находиться энкодер, который отслеживает частоту вращения. Также система управления может иметь обратную связь по току двигателя через шунт *R<sub>ш</sub>*, что должно обеспечить большую плавность его работы.



**Рис. 1. Функциональная схема гребного электропривода автономного подводного аппарата**

Выбор контура управления был осуществлён в пользу управления по скорости, поскольку скорость хода АПА будет зависеть от частоты вращения гребного винта. Система работает по отклонению скорости двигателя от эталонной (заданной). Разность между эталонной и фактической скоростью обрабатывается регулятором, затем подаётся на систему управления преобразователя постоянного напряжения, работающего на основе фазового сдвига между противоположными плечами инверторного моста. Сигналом регулятора является фазовый сдвиг и может принимать значение от  $1^\circ$  до  $180^\circ$ . Выходное напряжение с преобразователя подаётся на ДПТ, который в свою очередь вращает винт.

В качестве регулятора для мостового преобразователя был выбран классический пропорционально-интегральный регулятор  $W_{\text{рег}}(s)$  со следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{рег}}(s) = 0,04 + \frac{1}{2,5s}.$$

Имитационная модель системы электродвижения АПА, выполненная в *Simulink*, приведена на рис. 2.

Параметры преобразователя постоянного напряжения следующие: напряжение на аккумуляторе  $U_{\text{вх}} = 48$  В; сопротивление аккумулятора  $R_1 = 0,1$  Ом; индуктивность дополнительной катушки индуктивности  $L = 2$  мкГн; активное сопротивление дополнительной катушки индуктивности  $R_L = 1$  мОм; ёмкость конденсатора  $C = 10$  мкФ. Параметры трансформатора: коэффициент трансформации 1:7, активное сопротивление обмоток трансформатора 1 и 7 мОм, индуктивность обмоток трансформатора 1 и 7 мкГн соответственно. Частота коммутации составляет 2 кГц. Мертвое время было выбрано равным 1 мкс. Сопротивление транзисторов и диодов в открытом состоянии составляет 1 мОм. Параметры ДПТ: активное сопротивление

ние якоря  $R_a = 0,581$  Ом; индуктивность якоря  $L_a = 0,00428$  Гн; активное сопротивление обмотки возбуждения  $R_f = 105,9$  Ом; индуктивное сопротивление обмотки возбуждения  $L_f = 27,65$  Гн; взаимдукция между обмотками якоря и возбуждения  $L_{af} = 0,4038$  Гн; момент инерции  $J = 0,1$  кг·м<sup>2</sup>.

Момент сопротивления  $M_C$  винта имеет следующий вид:

$$M_C = 0,005\omega^2.$$

### Результаты компьютерного моделирования

В качестве характерных режимов работы электропривода АПА рассмотрим следующее:

- пуск электродвигателя ( $t_0 = 0$  с);
- резкое повышение частоты вращения электродвигателя ( $t_1 = 0,7$  с);
- резкое понижение частоты вращения электродвигателя ( $t_2 = 1,4$  с);
- плавное изменение частоты вращения электродвигателя ( $t_3 = 2$  с);
- установившийся режим работы ( $t_4 = 2,5$  с).

Для определения показателей качества работы воспользуемся следующим заданием частоты вращения: пуск от нуля до 80 рад/с, резкое повышение частоты вращения с 80 до 120 рад/с в момент времени  $t_1 = 0,7$  с, резкое понижение частоты вращения с 120 до 70 рад/с в момент времени  $t_2 = 1,4$  с, плавное понижение частоты вращения с 70 до 50 рад/с в момент времени  $t_3 = 2$  с за 0,5 с. Полученные результаты имитационного моделирования представлены на рис. 3.

Перерегулирование при пуске составляет 15%, в то время как время переходного процесса 0,25 с. При задании скорости в 100 рад/с перерегулирование также составит 15%, однако при частоте вращения в 40 рад/с перерегулирование уменьшится в 2 раза до 8,5%. Это значительно лучше ранее исследованного неизолированного преобразователя [10], который для расширения диапазона регулирования частоты вращения и высоких качеств регулирования нуждался в параметрическом регуляторе. Заброс при резком увеличении скорости и при резком сбросе скорости составляет 1,6 и 2,2 % соответственно. Очевидно, что чем выше частота вращения, тем больше времени надо для выхода на заданную скорость. Отличные показатели качества наблюдаются при плавном изменении частоты вращения. Динамическая ошибка не превышает 1,4%. С увеличением времени нарастания/убывания в 10 раз ошибка вырастает в 3 раза.

На рис. 4 приведен момент электродвигателя. Особых забросов не наблюдается, однако видно,

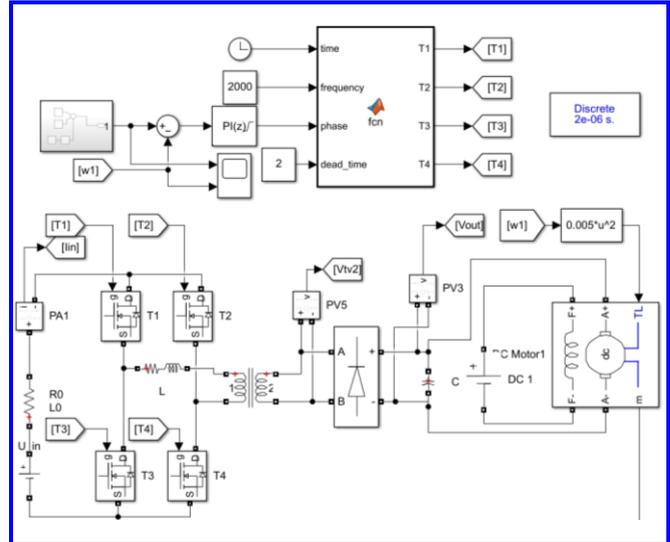


Рис. 2. Модель автоматического регулирования частоты вращения двигателем постоянного тока с двунаправленным преобразователем постоянного напряжения

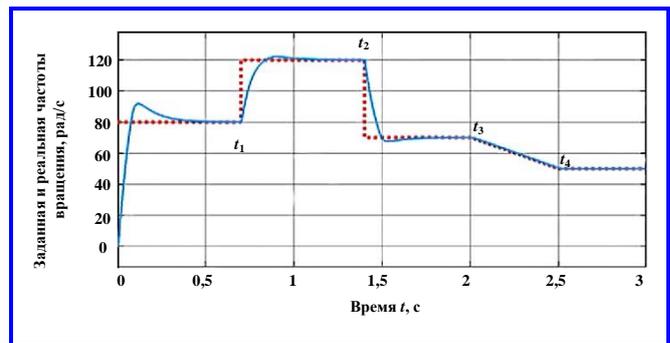


Рис. 3. Графики заданной (---) и фактической (—) частот двигателя постоянного тока при пуске

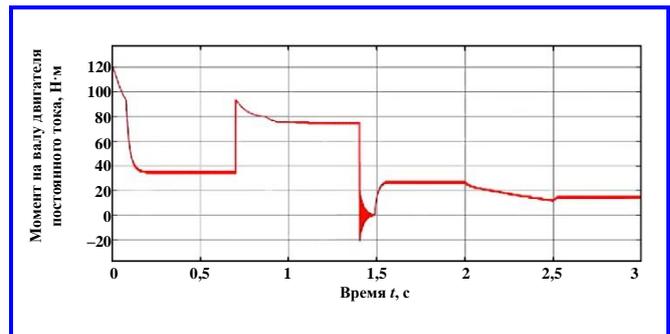


Рис. 4. График момента вращения двигателя постоянного тока

что резкое снижение скорости является для двигателя проблематичным. На данном этапе двигатель становится малоуправляемым из-за резких перепадов момента. Колебания момента невелики и их максимальное значение составляет 2 Н·м, что в относительном плане составляет всего 4%. Пусковой момент составляет 120 Н·м и время пуска для частоты вращения 80 рад/с составил 0,12 с.

На рис. 5 изображен график изменения мощности на валу ДПТ. Мощность находилась как произведение угловой частоты вращения на момент. В целом, график совпадает с графиком момента и частоты вращения. Отдельно заслуживает внимания момент резкого повышения частоты вращения до 120 рад/с. Из представленного графика видно, что набор мощности идёт очень медленно, а это значит, что электродвигатель практически достиг максимальной мощности.

На рис. 6 изображены осциллограммы напряжения (а) и тока (б). Из рисунков видно, что наибольшее значение напряжения наблюдается при резком набросе частоты вращения, которое составляет 29% от установившегося значения. Также можно наблюдать осцилляции напряжений и токов при резком снижении частот вращения, что может привести на непродолжительное время к потере устойчивой работы ДПТ. Очевидно, что для этих случаев требуется использовать плавное регулирование частоты вращения или вводить дополнительный подчиненный контур по току, как это было осуществлено в [12]. Пульсации напряжения могут быть нивелированы применением конденсатора с большей ёмкостью (или параллельное соединение нескольких конденсаторов), что в свою очередь

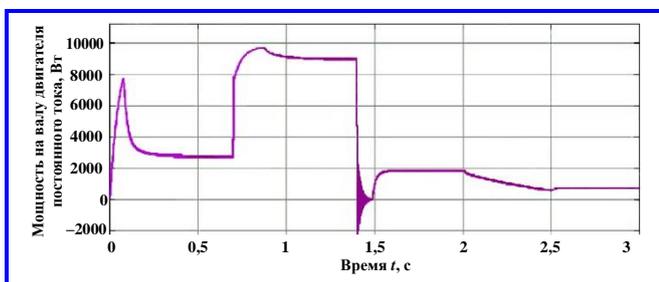


Рис. 5. График мощности на валу двигателя постоянного тока

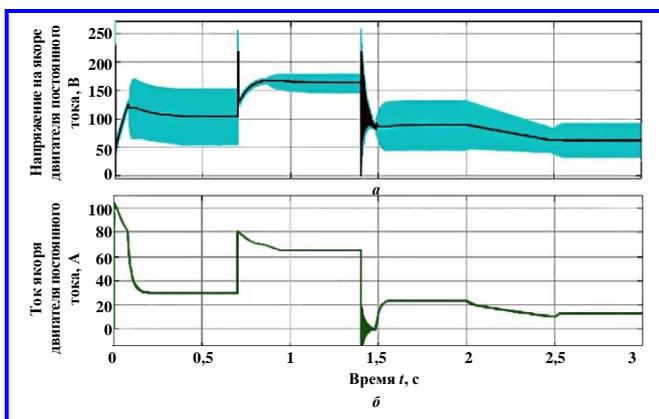


Рис. 6. Осциллограммы напряжения (а) и тока (б) при пуске двигателя постоянного тока

обернётся увеличением массогабаритных показателей. Ток не изменяется резко, поэтому дополнительный контур регулирования не обязателен.

### Заключение

Исходя из полученных результатов, можно сделать следующие выводы:

1. Переходные процессы при задании частоты вращения являются удовлетворительными при различных частотах вращения.

2. Качество переходных процессов при использовании изолированного преобразователя значительно выше, чем при использовании неизолированного преобразователя, отсутствуют пульсации тока и напряжения.

3. Переходный процесс при резких перепадах задающего значения (в особенности при реверсе) может негативно влиять на управляемость системы, поэтому рекомендуется использовать плавное изменение скорости.

### Литература

1. Semenov, N. N. Effectiveness evaluation of multi-agent control systems for autonomous underwater vehicles for underwater operation / N. N. Semenov, V. G. Mikhlin, D. B. Akhmetov // Computing, Telecommunications and Control. – 2023. – Vol. 16. – № 1. – P. 60–68.
2. Жилияков, П. В. Исследование устойчивости системы наведения автономных подводных аппаратов в присутствии подводных течений / П. В. Жилияков // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2023. – № 6. – С. 187.
3. Определение энергоэффективных режимов работы маршевого электродвигателя автономного плавательного аппарата / Я. Б. Волянская, С. М. Волянский, А. Н. Волков [и др.] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2017. – Т. 6. – № 8 (90). – С. 11–16.
4. Chan, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles / C. C. Chan // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 90. – Issue 2. – P. 247–275.
5. Emadi, A. Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles / A. Emadi, Y. J. Lee, K. Rajashekara // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – Issue 6. – P. 2237–2245.
6. Integration of a bi-directional DC-DC converter model into a real-time system simulation of a shipboard medium voltage DC system / Y. Chung, W. Liu, K. Schoder [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2011. – Vol. 81. – P. 1051–1059.
7. Создание систем электродвижения для судов различного назначения / В. И. Вершинин, С. В. Махонин, В. А. Паршиков [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – Вып. 1(387). – С. 107–122.

8. Drtil, M. Electronics and sensor design of an autonomous underwater vehicle / M. Drtil // A thesis submitted for the degree of Diplom-Ingenieur Elektrotechnik. – Koblenz, 2006 – P. 182.
9. Rout, R. Control of Autonomous Underwater Vehicles / R. Rout // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Technology by Research. – Odisha, 2013. – P. 75.
10. Моделирование работы двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в составе привода гребного винта автономных подводных аппаратов / Б. А. Авдеев, А. В. Вынгра, С. П. Голиков [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2019. – Специальный выпуск 2. – С. 152–159.
11. Авдеев, Б. А. Расчёт индуктивности для двунаправленного преобразователя постоянного напряжения в автономных подводных аппаратах / Б. А. Авдеев // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2018. – № 4. – С. 107–114.
12. Авдеев, Б. А. Исследование работы системы управления гребного электропривода автономных подводных аппаратов / Б. А. Авдеев, А. В. Вынгра, С. Г. Черный // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2022. – № 3. – С. 108–121.
13. Ulissi, G. Solid-State Technology for Shipboard DC Power Distribution Networks / G. Ulissi, S. Kim, D. Dujic // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2021. – Vol. 68. – P. 12100–12108.
14. Cuculić, A. Solid State Transformers for Ship's Electrical Power System / A. Cuculić, J. Celic, R. Prenc // Journal of Maritime & Transportation Science. – 2018. – Vol. 54. – P. 53–60.
15. Виноградов, К. А. Об определении относительной скорости автономных необитаемых подводных аппаратов тахометрическим способом / К. А. Виноградов, С. И. Иванов // Навигация и гидрография. – 2019. – № 57. – С. 49–57.
16. Чернобай, К. С. Определение резонансной частоты на валу гребного электродвигателя автономного подводного аппарата / К. С. Чернобай, А. В. Баранчиков // Наука, образование, молодежь: горизонты развития. Материалы II Национальной научно-практической конференции; редакционная коллегия: Е. П. Масюткин [и др.]. – Керчь, 2022. – С. 71–77.
17. Скороход, Б. А. Применение закона пропорциональной навигации для наведения автономных подводных аппаратов / Б. А. Скороход // Морские интеллектуальные технологии. – 2023. – № 4-1. – С. 123–133.
18. Расчет и моделирование преобразователя постоянного напряжения с промежуточным резонансным высокочастотным инвертором / А. А. Мартынов, В. К. Самсыгин, Д. В. Соколов [и др.] // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2018. – Вып. 4(386). – С. 139–148.
19. Segaran, D. S. Dynamic Modelling and Control of Dual Active Bridge Bi-directional DC-DC Converters for Smart Grid Applications / D. S. Segaran // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. – 2013. – P. 274.

Поступила в редакцию 09.08.2024

*Борис Александрович Авдеев, кандидат технических наук, доцент, начальник лаборатории, т. 8 (978) 776-97-96, e-mail: dirigeant@mail.ru.*

*Сергей Григорьевич Черный, кандидат технических наук, профессор, e-mail: sergiiblack@mail.ru.*

*Александр Сергеевич Кустов, аспирант, исследователь лаборатории, e-mail: kustovaleksandrkerch@mail.ru.*

*Андрей Владимирович Дегтярев, аспирант, исследователь лаборатории, т. 8 (960) 447-77-33, e-mail: captainandreydegtyarev@gmail.com. (ФГБОУ ВО «Херсонский технический университет»).*

## DEVELOPMENT OF ELECTRICAL POWER SYSTEM AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE BASED ON A SOLID-STATE TRANSFORMER

**B. A. Avdeev, S. G. Chernyi,  
A. S. Kustov, A. V. Degtyarev**

*Increasing the efficiency of the «battery – converter – propulsion electric drive» complex is a primary factor in increasing the autonomy of operation and the payload of autonomous underwater vehicles. A simulation model in the MATLAB/Simulink package of an AUV electric power system based on a solid-state transformer is considered. Performance indicators are determined. The system operation is analyzed and shortcomings such as current surges during start-up and voltage surges when switching the converter operating mode are identified. Ways to reduce weight and size indicators and increase efficiency are determined.*

**Key words:** autonomous underwater vehicle, solid-state transformer, bridge converter, DC motor, controller.

### References

1. Semenov, N. N. Effectiveness evaluation of multi-agent control systems for autonomous underwater vehicles for underwater operation / N. N. Semenov, V. G. Mikhlin, D. B. Akhmetov // Computing, Telecommunications and Control. – 2023. – Vol. 16. – № 1. – P. 60–68.

2. Zhilyakov, P. V. Study of the stability of the guidance system of autonomous underwater vehicles in the presence of underwater currents / P. V. Zhilyakov // Modern problems of radio electronics and telecommunications. – 2023. – No. 6. – P. 187.
3. Determination of energy-efficient operating modes of the main electric motor of an autonomous swimming apparatus / Ya. B. Volyanskaya, S. M. Volyansky, A. N. Volkov [et al.] // East European Journal of Advanced Technologies. – 2017. – Vol. 6. – No. 8 (90). – P. 11–16.
4. Chan, C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles / C. C. Chan // Proceedings of the IEEE. – 2002. – Vol. 90. – Issue 2. – P. 247–275.
5. Emadi, A. Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles / A. Emadi, Y. J. Lee, K. Rajashekar // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2008. – Vol. 55. – Issue 6. – P. 2237–2245.
6. Integration of a bi-directional DC-DC converter model into a real-time system simulation of a shipboard medium voltage DC system / Y. Chung, W. Liu, K. Schoder [et al.] // Electric Power Systems Research. – 2011. – Vol. 81. – P. 1051–1059.
7. Creation of electric propulsion systems for vessels for various purposes / V. I. Vershinin, S. V. Makhonin, V. A. Parshikov [et al.] // Proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2019. – Issue. 1(387). – P. 107–122.
8. Drtil, M. Electronics and sensor design of an autonomous underwater vehicle / M. Drtil // A thesis submitted for the degree of Diplom-Ingenieur Elektrotechnik. – Koblenz, 2006 – P. 182.
9. Rout, R. Control of Autonomous Underwater Vehicles / R. Rout // A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the award of the degree of Master of Technology by Research. – Odisha, 2013. – P. 75.
10. Modeling the operation of a bidirectional DC-DC converter as part of the propeller drive of autonomous underwater vehicles / B. A. Avdeev, A. V. Vyngra, S. P. Golikov [et al.] // Proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2019. – Special issue 2. – P. 152–159.
11. Avdeev, B. A. Calculation of inductance for a bidirectional DC-DC converter in autonomous underwater vehicles / B. A. Avdeev // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technology. – 2018. – No. 4. – P. 107–114.
12. Avdeev, B. A. Study of the operation of the control system of the propeller electric drive of autonomous underwater vehicles / B. A. Avdeev, A. V. Vyngra, S. G. Cherny // Information technologies and computing systems. – 2022. – No. 3. – P. 108–121.
13. Ulissi, G. Solid-State Technology for Shipboard DC Power Distribution Networks / G. Ulissi, S. Kim, D. Dujic // IEEE Trans. Ind. Electron. – 2021. – Vol. 68. – P. 12100–12108.
14. Cuculić, A. Solid State Transformers for Ship's Electrical Power System / A. Cuculić, J. Celic, R. Prenc // Journal of Maritime & Transportation Science. – 2018. – Vol. 54. – P. 53–60.
15. Vinogradov, K. A. On determining the relative speed of autonomous uninhabited underwater vehicles by the tachometric method / K. A. Vinogradov, S. I. Ivanov // Navigation and hydrography. – 2019. – No. 57. – P. 49–57.
16. Chernobay, K. S. Determination of the resonant frequency on the shaft of the propeller electric motor of an autonomous underwater vehicle / K. S. Chernobay, A. V. Baranchikov // Science, education, youth: horizons of development. Materials of the II National Scientific and Practical Conference; editorial board: E. P. Masyutkin [and others]. – Kerch, 2022. – P. 71–77.
17. Skorokhod, B. A. Application of the law of proportional navigation for guidance of autonomous underwater vehicles / B. A. Skorokhod // Marine intelligent technologies. – 2023. – No. 4-1. – P. 123–133.
18. Calculation and modeling of a DC voltage converter with an intermediate resonant high-frequency inverter / A. A. Martynov, V. K. Samsygin, D. V. Sokolov [et al.] // Proceedings of the Krylov State Scientific Center. – 2018. – Issue. 4(386). – P. 139–148.
19. Segaran, D. S. Dynamic Modelling and Control of Dual Active Bridge Bi-directional DC-DC Converters for Smart Grid Applications / D. S. Segaran // A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. – 2013. – P. 274.

**Boris Aleksandrovich Avdeev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Laboratory,  
t. 8 (978) 776-97-96, e-mail: dirigeant@mail.ru.

**Sergei Grigorievich Chernyi**, Candidate of Technical Sciences, professor, e-mail: sergiiblack@mail.ru.

**Aleksandr Sergeevich Kustov**, PhD student, researcher, e-mail: kustovaleksandrkerch@mail.ru.

**Andrey Vladimirovich Degtyarev**, PhD student, researcher, t. 8 (960) 447-77-33,  
e-mail: captainandreydegtyarev@gmail.com.  
(FSBEI HE «Kherson Technical University»).