

Вопросы управления движением и техническими средствами автономных судов

В. М. Амбросовский^{1✉}, А. Д. Груверман²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² АО «ОСК-Технологии», Санкт-Петербург

✉ v-ambr@mail.ru

Аннотация. Приведены категории автономных судов в соответствии с классификацией Регистра судостроения; определены варианты установки средств управления движением и маневрированием, которые могут быть использованы на автономных судах; определен состав основных систем автоматического управления и маневрирования автономных судов; предложен состав навигационных систем и датчиков, необходимых для автоматизации движения и маневрирования автономного судна. Рассмотрены общие вопросы автоматизации автономных судов; представлен анализ работ зарубежных авторов по этому вопросу; предложена структура систем автоматического управления движением и маневрированием автономного судна; приведены и рассмотрены структуры систем автоматического управления техническими средствами и общей системы контроля и управления; рассмотрены системы связи автономного судна с береговым постом управления; определен состав задач автоматизации технических средств и автономного судна.

Ключевые слова: управление движением, автономные суда, безэкипажные суда, управление техническими средствами, бортовая система, динамическое позиционирование.

Для цитирования: Амбросовский В. М., Груверман А. Д. Вопросы управления движением и техническими средствами автономных судов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 7. С. 61–67. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-61-67.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Original article

Questions of Motion Control and Technical Means Control of Autonomous Ships

V. M. Ambrosovsky^{1✉}, A. D. Gruwerman²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² OSK-T company, Saint Petersburg

✉ v-ambr@mail.ru

Abstract. This article presents the categories of autonomous vessels in accordance with the classification of the Shipbuilding Register, identifies options for installing motion and maneuvering controls that can be used on autonomous vessels, defines the composition of the main automatic control and maneuvering systems of autonomous vessels, suggests the composition of the necessary navigation systems and sensors for automating the movement and maneuvering of an autonomous vessel, discusses general issues automation of autonomous vessels, an analysis of the works of foreign authors on this issue is presented, the structure of automatic motion control and maneuvering systems of an autonomous vessel is proposed, the structures of automatic control systems of technical means and the general control and dispatching system, the communication system of an autonomous vessel with a coastal control post are considered, the composition of the tasks of automation of technical means and automation of an autonomous vessel is determined.

Keywords: vessel motion control, autonomous vessels, unmanned vessels, control of technical means, on-board system, dynamic positioning.

For citation: Ambrosovsky V. M., Gruwerman A. D. Questions of Motion Control and Technical Means Control of Autonomous Ships // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 7. P. 61–67. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-7-61-67.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В последние годы вырос интерес к безэкипажным, или автономным, судам (АС). Под этим понимают различные морские подвижные объекты (МПО), используемые на установившихся линиях движения судов или в относительно ограниченном водном бассейне, управляемые дистанционно или полностью автономные. Классификационные общества (как российские, так и зарубежные) вводят классификацию и предъявляют требования к таким МПО. Эти требования пока несколько противоречивы и не до конца сформировались ввиду новизны области.

Так, Регистр судостроения [1] подразделяет автономные суда на следующие категории:

1) управляется экипажем, системы автономной навигации и управления используются для части функций и как системы поддержки принятия решений;

2) управляется дистанционно, но на борту присутствует экипаж;

3) управляется дистанционно из берегового центра управления БЦУ, на борту нет экипажа;

4) полностью управляется автоматически.

Аналогичную классификацию предлагает и DNV [2], появляются требования к автономным судам и у других классификационных обществ, а также у Международной морской организации – ИМО [3].

В задачах построения систем управления для автономных судов с системами управления движением для обычных судов дополнительно появляются новые задачи. Отметим некоторые из них:

- автоматизация навигационного обеспечения;
- автоматизация судовождения;
- автоматизация контроля и управления техническими средствами;
- интеллектуализация навигационно-измерительных датчиков;
- перенос функций экипажа на береговой пост управления и снижение нагрузки на экипаж, если таковой имеется на борту АС.

Автономное судно (независимо от степени автоматизации) должно быть обеспечено надежными системами связи с береговыми постами управления:

- узкополосная система связи, предназначенная для обмена техническими данными;
- широкополосная система связи, предназначенная для передачи видеоизображений и радиолокационных изображений.

Некоторые из этих аспектов освещаются в современной литературе.

Так, в [4] приведены типы автономных судов, рассмотрено создание флота АС, которые, как предполагается, будут укомплектованы экипажами при отправлении из порта и заходе в порт и будут автономны во время прохождения маршрута.

В [5], [6] уделяется большое внимание связи с берегом. В [5] рассмотрены вопросы взаимодействия между БЦУ и АС, организации управления и контроля за автономными перевозками, а также предотвращения аварий и экологической безопасности при использовании АС. В [6] рассматриваются вопросы обеспечения безопасности связи между БЦУ и АС, вопросы подключения АС к БЦУ и структура систем связи.

В [7] уделяется большое внимание общим вопросам и вопросам безопасности. Рассмотрены роль операторов и вопросы безопасности АС и связь АС со степенью их автоматизации.

В [8], [9] уделяется внимание автопрокладке траекторий для движения с учетом препятствий. Так, в [8] рассматриваются математическая модель движения (ММД) АС, вопросы алгоритмов управления и их корректировка в процессе движения, задача определения оптимального маршрута движения АС и управления АС при движении по заданному маршруту. В [9] рассмотрены вопросы использования систем динамического позиционирования для управления АС и формирования траекторий движения вблизи морских конструкций с учетом ограничений на кинематические параметры и конфигурацию используемых средств управления, накладываемых правилами безопасности.

В данной статье будут рассмотрены вопросы управления движением и маневрированием автономных судов.

Управление движением и маневрированием автономных судов. Система автоматического управления движением и маневрированием (САУДиМ) автономного судна должна решать задачи, определяемые назначением судна (МПО), но в общем случае это автоматические системы:

- управления курсом;
- управления динамическим позиционированием;
- предупреждения столкновений и аварий движения.

Если для «обычных» МПО первые две задачи решаются установкой авторулевой и СУ ДП (или джойстиковой системы), а третья полностью ложится на судоводителя, то для автономного МПО целесообразно иметь единую систему, объединяющую все три эти задачи. Целесообразно также дополнить эти три системы четвертой – системой автоматической швартовки.

Для обеспечения штатного функционирования перечисленных САУДиМ АС необходимо, чтобы АС было оборудовано необходимыми средствами управления движением и маневрированием, а также набором датчиков информации.

Минимальный набор средств управления движением должен обеспечивать удержание в точке с той или иной точностью, удержание на курсе и на траектории. Такие минимальные требования аналогичны требованиям, которые предъявляются к судам, оборудованным СУ ДП (класса ДПО – систем без аппаратного резервирования). Однако в режимах управления СУ ДП большое внимание уделяется движению на малых ходах в заданном направлении и компенсации внешних возмущений (ветер, течение, волнение). Такие требования для большинства АС могут быть смягчены – по сути дела, требуется удержание в точке с оптимальным курсом (нос или корма АС направлены на среднее действующее возмущение) без требования двигаться в произвольных направлениях на малых скоростях.

Фактически это означает, что диаграмма удержания судна – диаграмма возможных сил, создаваемых средствами управления судном [10], – вблизи нулевого момента охватывает точку 0 в области заданных сил, т. е. можно создавать небольшую силу во всех направлениях вблизи нулевого значения.

Примеры вариантов установки (компоновки) средств управления движением, позволяющих управлять автономным МПО как в режиме позиционирования, так и на больших ходах (на курсе и по траектории) приведены на рис. 1.

Следует отметить, что реализация автоматических САУДиМ возможна только при плавной регулировке упоров средств управления (работа в импульсном режиме возможна, но как правило затрудняет алгоритмы и ухудшает надежность и точность управления), а также при использовании средств управления, допускающих длительное управление в режимах переключения направления. И тут видится перспективным полное электродвижение, что позволяет плавно регулировать упоры всех средств управления.

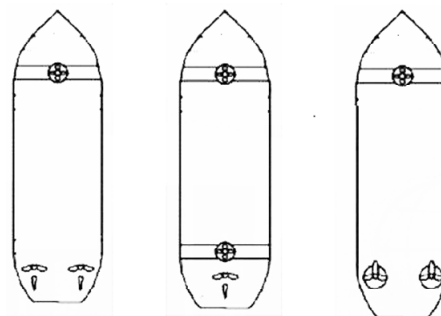


Рис. 1. Варианты установки средств управления движением и маневрированием на автономных судах

Fig. 1. Actuators configuration examples for motion control of autonomous ships

В случае, если требуется обеспечить устойчивость к отказам средств управления, требования могут быть повышены и набор средств управления должен обеспечивать функционирование системы управления движением при наихудшем отказе. Это соответствует требованиям к классу ДП-2 судов по средствам управления движением.

Существует два подхода к реализации управления движением и маневрированием.

Первый и общепринятый подход – тот, при котором авторулевой (система управления курсом судна) получает управление при переходе на высокие скорости и при необходимости решать задачи удержания курса и на траектории, а СУ ДП получает управление при переходе на небольшие скорости хода и при необходимости удерживать точку, область или траекторию на малых ходах. Такой подход проиллюстрирован рис. 2.

Однако современные системы управления динамическим позиционированием, как правило, имеют «всескоростные» режимы, которые позволяют решать задачи управления в широком диапа-

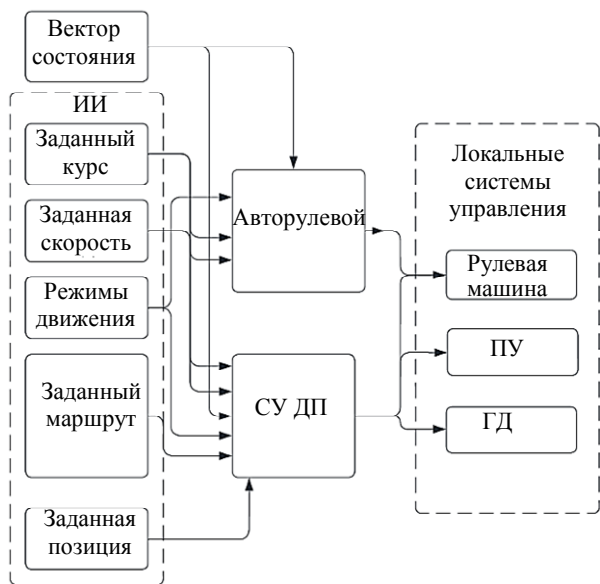


Рис. 2. Структура САУДиМ автономного судна, где ПУ – подруливающее устройство, ГД – главный двигатель

Fig. 2. Block diagram of motion control system for autonomous ship, where ПУ – thruster, ГД – main engine

зоне скоростей. В качестве примера можно привести систему DP5000 (АО «Навис», Санкт-Петербург). Для таких систем можно реализовать второй подход – плавный переход от малых ходов к большим, с режимами мягкого торможения, и с переходом удержания курса на высоких скоростях к удержанию курса и точки на малых ходах. Такой подход перспективен, но несколько нетрадиционен ввиду того, что авторулевой, например, относят к навигационному оборудованию и к нему предъявляются иные требования, чем к функции удержания курса в СУ ДП.

Но так как САУДиМ АС должны оптимизировать использование средств управления в соответствии с режимом движения и задачей управления в отличие от традиционных судов, где выбор используемых средств управления и навигационных датчиков определяется оператором, то второй подход к реализации управления движением и маневрированием представляется более перспективным.

Важный вопрос заключается в формировании программных траекторий и в решении задач расхождения судов (в том числе с учетом Международных правил предупреждения столкновений судов – МППСС) с учетом меняющейся обстановки. В зависимости от класса автономности судна данная задача может решаться как на борту, так и в БЦУ. Для некоторых АС может быть заложена жесткая программная траектория, в которую могут вноситься лишь локальные изменения во избежание столкновений. На рис. 2 блок форми-

рования маршрутов, заданных точек, курсов и т. п. сведен в единый алгоритм, который может решаться различными способами, но в данном вопросе перспективно использование искусственного интеллекта (ИИ), особенно при решении задач дистанционно (в БЦУ) [11].

В целом в управлении автономными объектами существуют различные подходы к формированию траекторий с учетом препятствий (графы видимости, диаграммы Вороного, сеточные алгоритмы Grid Map [9]), судно имеет определенные особенности по сравнению, скажем, с промышленными складскими роботами не может двигаться в произвольном направлении на скорости, имеет значительную инерцию и т. п., поэтому на ненулевой скорости для изменения направления движения (путевого угла) судну требуется изменить курс (курсовая стратегия управления на траектории [9]).

Важен и сам способ обнаружения препятствий на пути АС (статических или динамических). В этот блок должны быть заведены данные как о местоположении АС, так и о навигационных опасностях, препятствиях (электронные карты, автоматическая идентификационная система – АИС, лазерные дальномеры, системы компьютерного зрения).

Отдельной задачей, как правило решаемой оператором на неавтономном судне, служит автоматическая швартовка. Системы автоматической швартовки должны учитывать особенности судна, акватории, причала. В качестве датчиков могут выступать лазерные дальномеры и системы компьютерного зрения.

Рассмотрим выбор датчиков и систем определения местоположения для АС. Функционирование бортовых САУДиМ, как и дистанционного управления, требует навигационного обеспечения, включая автономные навигационные системы (АНС). Структура такого навигационного обеспечения показана на рис. 3.

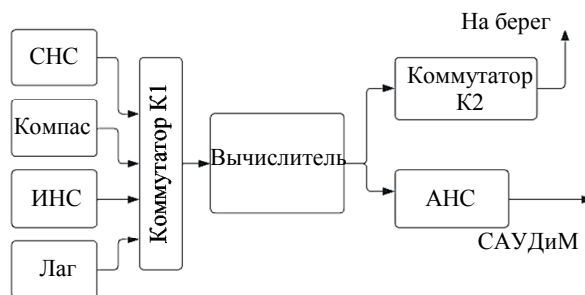


Рис. 3. Структура навигационного обеспечения АС
Fig. 3. Block diagram of autonomous ship navigation sensor processing system

Здесь спутниковые навигационные системы (СНС) – приемники GPS/Glonass информации (для АС должно быть учтено, что на пути их следования могут встречаться районы или периоды времени пропадания сигнала СНС).

СНС могут дополняться инерциальными навигационными системами (ИНС) на базе инерциальных измерительных блоков, которые состоят из линейных акселерометров и датчиков угловых скоростей и позволяют определять угловую ориентацию АС, определять линейные скорости и осуществлять кратковременное счисление при пропадании сигналов СНС.

Возможно дополнение измерителем скорости (лагом), который позволит определять продольную скорость АС при отсутствии измерений СНС.

Для определения курса АС можно использовать гиро-, магнитный или электронный (fluxgate) компас, требования к компасу определяются необходимыми точностями и скоростями выставки курса.

Комплексная обработка навигационной информации может выполняться либо в отдельном блоке, либо внутри системы управления движением. Традиционно СУ ДП (класса выше 0) принимает необработанную информацию от ряда датчиков и систем измерения местоположения, в том числе относительных – что делается для обеспечения резервирования. Аналогичные алгоритмы могут быть выполнены и отдельно в вычислителе, как это показано на рис. 3. Такие алгоритмы совместной обработки ряда навигационных датчиков позволяют определить местоположение, ориентацию, а также диагностировать отказы и сбои навигационных датчиков. Выход (оцененный вектор состояния АС – т. е. углы ориентации, угловые скорости, линейные скорости, координаты центра масс) может быть передан в БЦУ для мониторинга движения АС, а также передан в САУДиМ.

Современные же авторулевые, как правило, принимают курс из одного или нескольких источников и допускают прием данных от интегрированной навигационной системы с показателями качества различных данных, что позволяет при использовании схемы с отдельными авторулевым и СУ ДП (см. рис. 2) подавать в авторулевой данные АНС (автономной навигационной системы).

В случае использования СУ ДП в составе САУДиМ целесообразно использовать и данные от АНС в качестве источника местоположения.

Таким образом, предлагается выделить единый блок обработки информации и вынести его

за пределы САУДиМ, который выполняет функцию обработки навигационных данных.

Управление техническими средствами автономных судов. Автономное судно также должно быть оборудовано интегрированными системами управления и контроля ИСУ техническими средствами (ТС).

К задачам ИСУ ТС АС относятся:

- автоматические системы пожарной сигнализации и пожаротушения;
- автоматические система контроля и управления общесудовыми системами;
- автоматическая система управления энергетической и электроэнергетической установками;
- автоматическая система контроля и управления посадкой АС.

Пример такой структуры ИСУ ТС показан на рис. 4 (УВВ – устройство ввода/вывода). Существенное отличие системы ИСУ ТС автономного судна – отсутствие оператора не только в машинном отделении, но и на мостике, что требует принятия решений по пуску и останову агрегатов в автоматическом режиме. В современных реалиях данный аспект деятельности целесообразно возложить на искусственный интеллект, обучение можно проводить в рамках стендового тестирования.

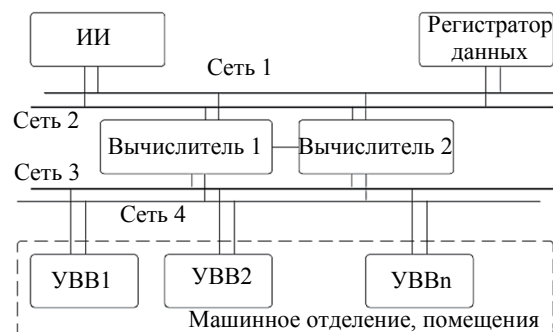


Рис. 4. Структуры ИСУ ТС АС

Fig. 4. Block diagram of technical means control system for autonomous vessel

Задачи мониторинга АС. К важным и неоднозначным аспектам создания автоматической системы управления автономным судном относится мониторинг. С целью контроля движения и технических средств АС основная информация должна не только регистрироваться в судовом регистраторе («черном ящике»/VDR), как это требуется в интегрированных системах, но и передаваться в БЦУ, и здесь особенно важна безопасность каналов связи. В некоторых случаях информация в БЦУ должна выгружаться не мгновенно.

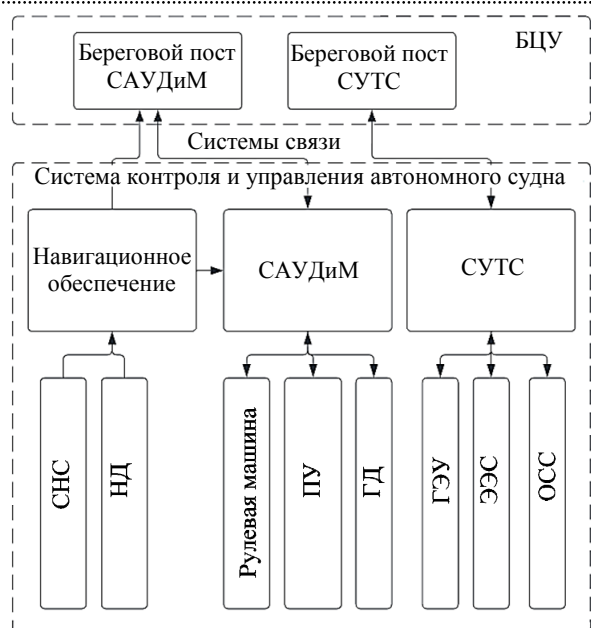


Рис. 5. Общая структура систем контроля и управления АС
Fig. 5. General block diagram of motion and technical means control for autonomous ship

Заключение. Для обеспечения автономности судна необходимо решить следующие основные задачи:

- создать береговые автоматизированные рабочие места (АРМ) в БЦУ;
- разработать бортовую автоматическую систему контроля и управления, которая включает авто-

матическое навигационное обеспечение, автоматический контроль и управление движением и маневрированием, автоматический контроль и управление ТС, автоматическую швартовку;

- создать системы связи БЦУ и АС.

Общая структура систем контроля и управления АС показана на рис. 5, где НД – навигационные датчики; ГЭУ – главная энергетическая установка; ЭЭС – электроэнергетическая система; ОСС – общесудовые системы; СУТС – система управления техническими средствами судна.

Авторами отмечены особенности, отличающие САУДиМ АС и ИСУ ТС АС от систем обычного судна, – появление новых задач автоматической смены режимов движения, формирования заданных маршрутов, заданного курса и позиции с учетом окружающей обстановки – в том числе расхождения с другими судами, необходимость в задаче управления техническими средствами принимать решение о пуске и останове агрегатов в полностью автоматическом режиме, необходимость как локальной, так и удаленной (в БЦУ) регистрации данных о движении и состоянии технических средств, важность систем связи с береговым центром управления как в плане качества связи, так и в плане безопасности этих соединений.

Список литературы

1. Положения по классификации морских автономных и дистанционно-управляемых надводных судов (МАНС) НД № 2-030101-037 СПб.: РМРС, 2020. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719949.pdf?ysclid=liu5cgjum8498029351> (дата обращения 20.05.23).
2. DNV (2021). Autonomous and remotely-operated ships [accessed: 2021-07-31]. URL: www.dnv.com/maritime/autonomous-remotely-operated-ships/research-activities.html (дата обращения 20.05.23).
3. IMO. (2018). Framework for the regulatory scoping exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). MSC 100/20/Add.1, Annex 2 [online, accessed: 2021-07-31]. URL: https://maiif.org/wp-content/uploads/2019/06/MSC-100_20-Annex-20-1.pdf (дата обращения 20.05.23).
4. Wasilewski W., Wolak K., Zaraś M. Autonomous shipping. The future of the maritime industry // *Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie*. 2021. Vol. 51. P. 155–163.
5. Maritime autonomous surface ships: Problems and challenges facing the regulatory process / M. Issa, A. Ilinca, H. Ibrahim, P. Rizk // *Sustainability*. Vol. 2022, no. 14. P. 15630. doi: 10.3390/su142315630.
6. Connectivity for autonomous ships: Architecture, use cases, and research challenges / M. Høyhty, J. Huusko, M. Kiviranta, K. Solberg, J. Rokka. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8191000> (дата обращения 21.05.23).
7. Kim T., Perera L. Sollid MPI. Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments // *WMU J Marit Affairs*. 2022. Vol. 21. P. 141–159.
8. Kim M.-K., Kim J.-H., Yang H. Optimal route generation and route-following control for autonomous vessel // *J. of Marine Sci. and Engin.* 2023. Vol. 11(5). P. 970. doi: 10.3390/jmse11050970.
9. Safe maneuvering near offshore installations: A new algorithmic tool / I. Maslov, E. Ambrosovskaya, A. Dvorkin, A. Proskurnikov // *IEEE J. of Oceanic Engin.* 2022. Vol. 47, no. 4. P. 895–915.
10. Proskurnikov A., Ambrosovskaya E. Thrust ability diagrams for multi-thruster marine vessels // *IFAC Proc. Volumes (IFAC-PapersOnline)*. Arenzano, 2012. P. 152–157. doi: 10.3182/20120919-3-IT-2046.00026.
11. Амбросовский В. М., Казунин Д. В., Смоленцев С. В. Дистанционное управление безэкипажными судами // *Морской вестн.* 2021. № 3 (79). С. 105–108.

Информация об авторе

Амбросовский Виктор Михайлович – канд. техн. наук, доцент СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: v-ambr@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0005-2551-212X>

Груверман Александр Давыдович – гл. конструктор АО «ОСК-Технологии», наб. Обводного канала, 93А, Санкт-Петербург, 191119, Россия.

E-mail: Gruverman.a@osk-t.ru

References

1. Polozhenija po klassifikacii morskikh avtonomnyh i distancionno-upravljajemyh nadvodnyh sudov (MANS) ND № 2-030101-037 SPb.: RMRS, 2020. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293719/4293719949.pdf?ysclid=liu5cgjum8498029351> (data obrashhenija 20.05.23). (In Russ.).
2. DNV (2021). Autonomous and remotely-operated ships [accessed: 2021-07-31]. URL: www.dnv.com/maritime/autonomous-remotely-operated-ships/research-activities.html (data obrashhenija 20.05.23).
3. IMO. (2018). Framework for the regulatory scoping exercise for the use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS). MSC 100/20/Add.1, Annex 2 [online, accessed: 2021-07-31]. URL: https://maiif.org/wp-content/uploads/2019/06/MSC-100_20-Annex-20-1.pdf (data obrashhenija 20.05.23).
4. Wasilewski W., Wolak K., Zaráś M. Autonomous shipping. The future of the maritime industry // Zeszyty Naukowe Małopolskiej Wyższej Szkoły Ekonomicznej w Tarnowie. 2021. Vol. 51. P. 155–163.
5. Maritime autonomous surface ships: Problems and challenges facing the regulatory process / M. Issa, A. Ilinca, H. Ibrahim, P. Rizk // Sustainability. Vol. 2022, no. 14. P. 15630. doi: 10.3390/su142315630.
6. Connectivity for autonomous ships: Architecture, use cases, and research challenges / M. Höyhtyä, J. Huusko, M. Kiviranta, K. Solberg, J. Rokka. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8191000> (data obrashhenija 21.05.23).
7. Kim T., Perera L. Sollid MPI. Safety challenges related to autonomous ships in mixed navigational environments // WMU J Marit Affairs. 2022. Vol. 21. P. 141–159.
8. Kim M.-K., Kim J.-H., Yang H. Optimal route generation and route-following control for autonomous vessel // J. of Marine Sci. and Engin. 2023. Vol. 11(5). P. 970. doi: 10.3390/jmse11050970.
9. Safe maneuvering near offshore installations: A new algorithmic tool / I. Maslov, E. Ambrosovskaya, A. Dvorkin, A. Proskurnikov // IEEE J. of Oceanic Engin. 2022. Vol. 47, no. 4. P. 895–915.
10. Proskurnikov A., Ambrosovskaya E. Thrust ability diagrams for multi-thruster marine vessels // IFAC Proc. Volumes (IFAC-PapersOnline). Arenzano, 2012. P. 152–157. doi: 10.3182/20120919-3-IT-2046.00026.
11. Ambrosovskij V. M., Kazunin D. V., Smolen-cev S. V. Distancionnoe upravlenie bezjektivnymi sudami // Morskoy vestn. 2021. № 3 (79). S. 105–108. (In Russ.).

Information about the author

Victor M. Ambrosovsky – Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: v-ambr@mail.ru

Alexander D. Gruverman, chief designer of JSC «OSK-Technologies», nab. Obvodnogo kanala, 93A, Saint Petersburg, 191119, Russia.

E-mail: Gruverman.a@osk-t.ru

Статья поступила в редакцию 27.05.2023; принята к публикации после рецензирования 04.06.2023; опубликована онлайн 25.09.2023.

Submitted 27.05.2023; accepted 04.06.2023; published online 25.09.2023.
