

DEVELOPMENT OF MAIN REQUIREMENTS FOR THE OPERATING SYSTEMS OF AN AUTOMATIC TUGBOAT FOR ESCORTING A MARITIME AUTONOMOUS SURFACE SHIP

V. V. Zaslouov¹, S. S. Zhuk¹, E. O. Ol'khovik²

¹ Admiral Ushakov Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

This article discusses the requirements for the main operating systems of an automatic tugboat designed to perform escort, mooring, and unmooring operations for vessels in port waters. The relevance of the work stems from the need to increase the safety and efficiency of port operations through the introduction of autonomous technologies. The architectural and structural features of the automatic tugboat, which ensure high maneuverability and operational reliability, are presented. Particular attention is paid to the key functional systems: the automatic navigation system and the situational awareness system. Mathematical models and algorithms are proposed for analyzing the navigation situation, adjusting routes, ensuring safe separation from other vessels, as well as methods for integrating data from various information sources (high-precision navigation systems, AIS, radar, log) using the Kalman filter. Requirements for the propulsion system with azimuth thrusters, the power supply system with redundancy, the rigid coupling system (including magnetic devices), and the emergency towing system are also described. The study results aim to create a safe, reliable, and highly automated automatic tugboat capable of effectively interacting with the environment and performing complex maneuvers in confined conditions.

Keywords: automatic tugboat, automatic navigation system, situational awareness system, safe separation, route correction, maneuverability characteristics, propulsion system, rigid coupling, power supply, emergency towing.

For citation:

Zaslouov, Vladimir V., S. S. Zhuk and E. O. Ol'khovik. "Development of main requirements for the operating systems of an automatic tugboat for escorting a maritime autonomous surface ship." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.4 (2025): 502–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-502-514.

УДК 656.61.052

РАЗРАБОТКА ОСНОВНЫХ ТРЕБОВАНИЙ К СИСТЕМАМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БУКСИРА-АВТОМАТА ДЛЯ ПРОВОДКИ МОРСКОГО АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО СУДНА

В. В. Заслонов¹, С. С. Жук¹, Е. О. Ольховик²

¹ Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова,
Новороссийск, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

В обзорной статье рассмотрены требования к основным системам функционирования буксира-автомата, предназначенного для выполнения операций сопровождения, швартовки и отшвартовки судов в портовых водах. Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения безопасности и эффективности портовых операций за счет внедрения автономных технологий. Представлены архитектурно-конструктивные особенности буксира-автомата, обеспечивающие высокую маневренность и эксплуатационную надежность. Особое внимание уделено ключевым функциональным системам: автоматической навигационной системе и системе ситуационной осведомленности. Предложены математические модели и алгоритмы для анализа навигационной обстановки, корректировки маршрута, обе-

спечения безопасного расхождения с другими судами, а также методы интеграции данных, полученные из различных источников информации (системы высокоточной навигации, АИС, РЛС, лаг) с использованием фильтра Калмана. Также описаны требования к пропульсивной системе с азимутальными движителями, системе энергообеспечения с резервированием, системе жесткой сцепки, включая магнитные устройства, а также системе аварийной буксировки. Результаты исследования направлены на создание безопасного, надежного и высокоавтоматизированного буксира-автомата, способного эффективно взаимодействовать с окружающей средой и выполнять сложные маневры в стесненных условиях.

Ключевые слова: буксир-автомат, автоматическая навигационная система, система ситуационной осведомленности, безопасное расхождение, корректировка маршрута, маневренные характеристики, пропульсивная система, жесткая сцепка, энергообеспечение, аварийная буксировка.

Для цитирования:

Заслонов В. В. Разработка основных требований к системам функционирования буксира-автомата для проводки морского автономного надводного судна / В. В. Заслонов, С. С. Жук, Е. О. Ольховик // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 4. — С. 502–514. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-4-502-514. — EDN EYXMDP.

Введение (Introduction)

Буксиры-автоматы (БА) предназначены для выполнения операций по буксировке (сопровождению) морского судна, включая проводку в акватории порта, обеспечение маневрирования в районе причала и выполнение швартовных операций [1].

БА должен быть спроектирован согласно действующим правилам и нормам Российского морского регистра судоходства (РС). В портах, где необходимо учитывать ледовую обстановку, должны эксплуатироваться БА соответствующего ледового класса. Ледовый класс БА (Ice2, Ice3, Arc4, Arc5, Arc6) должен быть выбран, согласно Правилам РС, Обязательным постановлениям порта и особенностям организации плана швартовных операций для конкретного порта.

Большой вклад для практического внедрения автономного судоходства благодаря своим исследованиям внесли: В. Г. Сенченко, Д. Е. Студеникин, С. В. Смоленцев, А. Б. Крючков, В. В. Клюев и др. На основе анализа работ [1–10] можно сделать вывод о техническом и технологическом составе систем БА. Например, корпус рассматриваемого инновационного судна должен отличаться от строящихся, так как он должен обеспечивать большую надежность ввиду отсутствия людей на борту, что, в свою очередь, выгодно отличает его от аналогичных судов. Такой БА должен обеспечить высокую маневренность, а также устойчивость ко всем видам качек. С целью достижения данных аспектов исследователи предлагают концептуальные варианты, проверенные с помощью имитационных, модельных и практических экспериментов. Кроме того, установлено, что основным элементом, оказывающим влияние в том числе на форму ее корпуса, является швартовное устройство, которое должно обеспечивать совместно движение судов при эскортировании, постановке и оттяжке грузового судна от причала. На основании проведенного анализа оптимальным и эффективным решением является применение жесткой сцепки в швартовном механизме на основе электромагнетизма.

Целью данного исследования является разработка и обоснование требований, предъявляемых к основным функциональным системам автономного БА, предназначенного для выполнения операций проводки и швартовки транспортных судов в условиях акватории морского порта.

Частные задачи исследования:

- анализ архитектурно-конструктивных особенностей БА, обеспечивающих высокую маневренность и устойчивость;
- формулирование требований к ключевым функциональным системам БА, включая автоматическую навигационную систему и систему ситуационной осведомленности;
- разработка математических моделей и алгоритмов для анализа навигационной обстановки, корректировки маршрута и обеспечения безопасного расхождения с другими судами;
- описание требований к системам управления движением, энергообеспечению, жесткой сцепке и аварийной буксировке;

– исследование методов интеграции данных от различных навигационных и информационных датчиков для повышения точности и достоверности информации в системах буксира-автомата.

Предметом исследования являются процессы функционирования БА в условиях портовой акватории, основные функциональные системы БА, обеспечивающие его автономное и безопасное маневрирование, включая автоматическую навигационную систему, систему ситуационной осведомленности, пропульсивную систему, систему энергообеспечения, систему жесткой сцепки и систему аварийной буксировки.

Методы и материалы (Methods and Materials)

По архитектурно-конструктивному типу БА должен представлять собой азимутальное однокорпусное судно, включая:

- U-образный корпус с вертикальным килем и развитой подошвой;
- U-образные обводы, симметричные относительно ДП и ПМШ с плоскими вертикальными бортами;
- плоскую палубу без бака и юта, без жилой надстройки;
- наибольшую ширину по КВЛ с симметричными баком и кормой;
- вертикальный киль с подкреплениями (горизонтальная часть киля должна соответствовать ширине БА для создания дополнительного упора);
- размещение электрооборудования в средней части корпуса;
- место для размещения ВРК в ДП в районе бака и кормы.

Компоновка корпуса буксира должна быть выполнена с таким расчетом, чтобы обеспечить движение носом и кормой с равной степенью эффективности (рис. 1) [2].

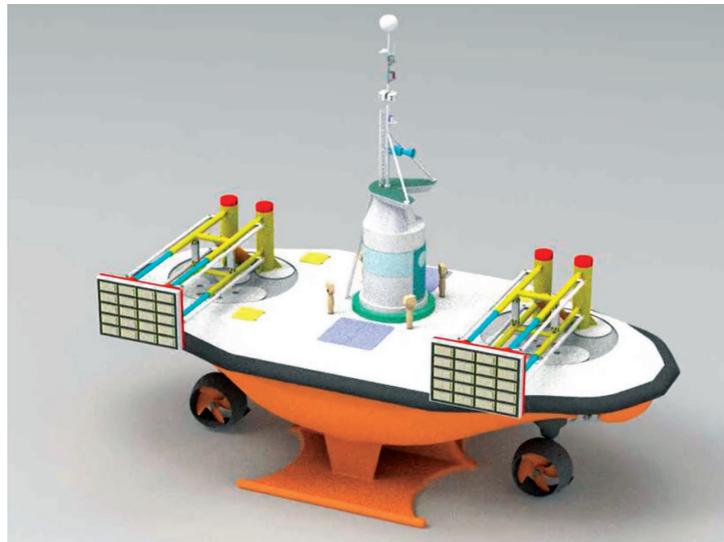


Рис. 1. Базовый концепт буксира-автомата

В данной работе принято, что основными системами БА являются:

- автоматическая навигационная система (АНС);
- система ситуационной осведомленности (ССО);
- система контроля и управления техническими средствами (СКУТС);
- система связи;
- пропульсивная система (ВРК);
- система энергообеспечения;
- система жесткой сцепки (к транспортному судну и к месту стоянки);
- система аварийной буксировки БА (другим / другого БА в аварийном режиме).

Рассмотрим требования, предъявляемые к основным системам: автоматической навигационной системе (АНС) и системе ситуационной осведомленности (ССО), системе контроля и управления техническими средствами (СКУТС).

Автоматическая навигационная система (АНС). Должна решать задачи навигации и обеспечивать навигационную безопасность плавания в автономном режиме (кроме случаев движения в жесткой сцепке с транспортным судном) с учетом гидрометеорологических условий и условий ограниченной видимости. При этом навигация должна обеспечиваться в стесненных условиях, когда БА ограничен в маневре из-за близости берегов, гидротехнических сооружений, пришвартованных судов, недостаточных глубин и других навигационных опасностей, а также интенсивного судоходства [3].

В состав АНС должны входить следующие функциональные блоки:

- модуль обеспечения навигации и маневрирования;
- модуль электронной картографической навигационной информационной системы.

Модуль обеспечения навигации и маневрирования должен обеспечивать:

- автоматическое решение задачи анализа и оценки навигационной обстановки;
- учет маневренных характеристик буксира-автомата;
- корректировку маршрута плавания БА, с учетом навигационной обстановки и гидрометеороусловий;
- безопасное расхождение с надводными целями в соответствии с МППСС-72 и местными правилами плавания;
- расчет параметров управления курсом и скоростью БА, обеспечивающих движение по заданному маршруту в соответствии с оперативным планом.

Модуль электронной картографической навигационной информационной системы должен предоставлять информацию о районе плавания в модуль обеспечения навигации и маневрирования для принятия им решений с учетом картографических данных (рис. 2).

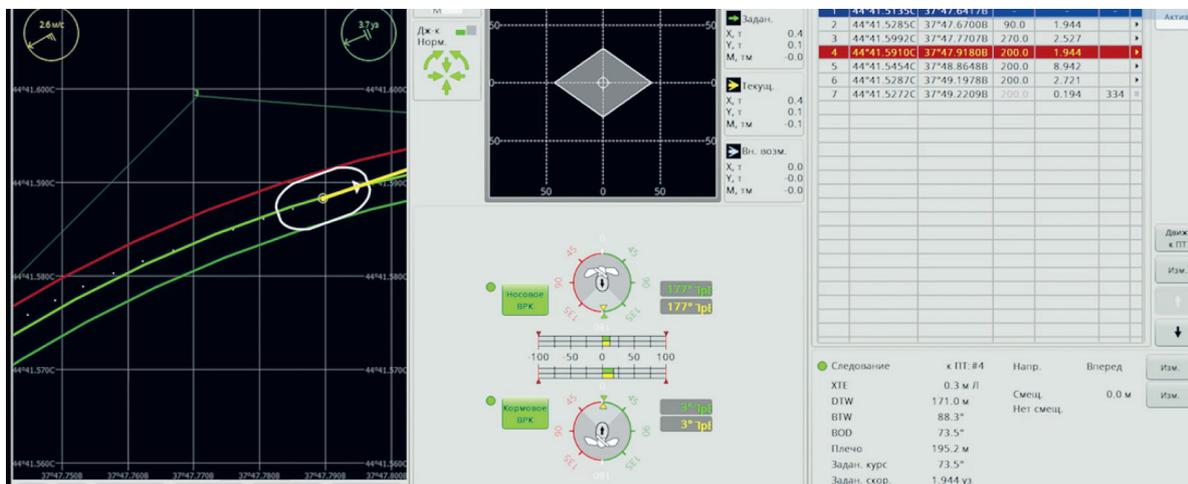


Рис. 2. Пример реализации функциональной панели автоматической навигационной системы буксира-автомата в рамках разработки ПДСП буксира-автомата ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова совместно с ООО «Сим Тех» и АО «НАВИС»

Базовые инструменты реализации АНС

Модуль обеспечения навигации и маневрирования. Отвечает за анализ навигационной обстановки, учет маневренных характеристик БА, корректировку маршрута и обеспечение безопасного расхождения с другими судами [4]. Математически это можно описать с использованием дифференциальных уравнений движения БА.

Уравнение движения буксира-автомата. Движение БА в плоскости описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos(\psi(t)); \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin(\psi(t)); \\ \dot{\psi}(t) = r(t), \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t), y(t)$ — координаты буксира в декартовой системе координат;
 $v(t)$ — скорость буксира;
 $\psi(t)$ — курсовой угол (угол между направлением движения и осью x);
 $r(t)$ — угловая скорость поворота буксира.

Корректировка маршрута. Производится на основе анализа текущей навигационной обстановки. Пусть $P_i(x_i, y_i)$ — точки маршрута, заданные в оперативном плане. Тогда отклонение от маршрута описывается следующим образом:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}. \quad (2)$$

Если $d_i > d_{\text{крит}}$, где $d_{\text{крит}}$ — допустимое отклонение, то маршрут корректируется. Новое направление движения вычисляется в виде

$$\psi_{\text{нов}} = \arctan\left(\frac{y_i - y}{x_i - x}\right). \quad (3)$$

Обеспечение безопасного расхождения. Для обеспечения безопасного расхождения с другими судами используется модель предсказания траекторий. Пусть (x_j, y_j) — координаты другого судна, v_j, ψ_j — его скорость и курс. Минимальное безопасное расстояние $D_{\text{безоп}}$ определяется в виде

$$D_{\text{безоп}} = \sqrt{(x - x_j)^2 + (y - y_j)^2} - R_{\text{безоп}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{безоп}}$ — радиус безопасной зоны.

Если $D_{\text{безоп}} < 0$, то необходимо изменение курса или скорости.

Модуль электронной картографической навигационной информационной системы. Предоставляет информацию о районе плавания. Карта представляется в виде сетки точек (x_k, y_k) , где каждая из них имеет характеристики: глубину, тип дна, наличие навигационных опасностей. Интерполяция данных выполняется с использованием метода билинейной интерполяции:

$$z(x, y) = z_{11}(1-u)(1-v) + z_{12}(1-u)v + z_{21}u(1-v) + z_{22}uv, \quad (5)$$

где z_{ij} — значения атрибутов в узлах сетки;

$$u = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1};$$

$$v = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}.$$

Система ситуационной осведомленности (ССО). Предназначена для сбора и обработки данных об условиях окружающей среды и о состоянии БА, а также его подсистем, необходимых для принятия верного и своевременного решения по управлению БА [5, 6].

Состав минимального набора источников информации для ССО БА: система высокоточной навигации, АИС, РЛС, двухосевой лаг, оптическая система анализа окружающей обстановки, лидары.

Требования к ССО

1. Объединение всех доступных источников информации, расположенных на БА и вне его, использующих оперативную и хронологическую информацию (координаты, курс, скорость, крен и углы бортовой качки, дифферент и углы килевой качки, параметры бортовых систем БА, состояние систем связи, положение точки Pivot Point, положения точки вращения БА / ордера, значения угловой скорости поворота БА / ордера, текущие координаты характерных точек корпуса БА /

ордера, информация об окружающих судах в районе проведения операции сопровождения транспортно-портного судна).

2. Обеспечение своевременности и достоверности ситуационной информации, необходимой для принятия верного и своевременного решения по управлению БА.

3. Информация, воспринимаемая и получаемая ССО БА при любом сценарии эксплуатации, должна передаваться в автономную навигационную систему (АНС) и в ЦДУ в режиме реального времени.

4. Оборудование и составные части ССО должны быть достаточно надежными для минимизации вероятности отказа. Оборудование системы ситуационной осведомленности должно быть укомплектовано и скомпоновано таким образом, чтобы не была нарушена его способность к восприятию информации либо в случае одиночного отказа оборудования она могла быть восстановлена в кратчайшие сроки для продолжения эксплуатации БА.

5. Оборудование системы ситуационной осведомленности должно иметь функции самодиагностики и сигнализации и обеспечивать непрерывный контроль во время нормальной эксплуатации оборудования. В случае обнаружения отказа оборудования должна быть обеспечена возможность его регистрации и передачи тревожного сообщения и сообщения об отказе в АНС и ЦДУ.

6. В случае отказов ССО БА, приводящих к нарушению способности восприятия обстановки во время навигации, АНС должна быть выполнена оценка необходимости перехода в состояние минимального риска, и в ЦДУ должна быть передана соответствующая тревожная информация.

7. Традиционные системы, являющиеся источниками информации для ССО БА, должны удовлетворять соответствующим требованиям РС.

8. Диапазон измерения, точность и временная задержка оборудования для обнаружения на близком расстоянии должны удовлетворять требованиям оперативности принятия решения при выполнении швартовных операций и движении в портовых водах;

9. Все оборудование ССО БА должно осуществлять сбор данных в режиме реального времени в соответствии с требованием о своевременном принятии решения.

10. ССО БА должна быть снабжена достаточным количеством датчиков и систем для определения, отображения и регистрации текущего времени, местоположения, ориентации и движения по отношению к Земле и скорости изменения параметров, измеренных с соответствующим интервалом и точностью, достаточными для обеспечения безопасности навигации;

11. Система высокоточной навигации должна обеспечивать непрерывную выработку информации о курсе, координатах, скорости движения и параметрах угловой ориентации БА.

12. С целью обеспечения избыточности информации определения местоположения БА могут быть использованы радионавигационные системы наземного базирования.

13. ССО может включать систему распознавания окружающей обстановки на базе радиолокации, обеспечивающей достаточный уровень пространственного разрешения для реализации режима радиовидения.

14. ССО должна включать средства, обеспечивающие получение непрерывного видеоизображения вокруг БА, способных к эксплуатации в сложных метеорологических условиях и в разных условиях суточной освещенности.

15. ССО собирает и обрабатывает данные об окружающей среде и состоянии БА. Взаимодействие элементов системы описывается через модели интеграции данных [7, 8].

Объединение источников информации для ССО БА. Пусть $S_i(t)$ — сигнал от i -го источника информации ($i = 1, \dots, N$). Общий вектор состояния системы $S(t)$ формируется в виде

$$S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_N(t)]. \quad (6)$$

Интеграция данных выполняется с использованием фильтра Калмана для устранения шумов и повышения точности:

$$\hat{S}(t) = \hat{S}(t-1) + K(t)(S(t) - H\hat{S}(t-1)), \quad (7)$$

где $\hat{S}(t)$ — оценка состояния системы;
 $K(t)$ — матрица усиления Калмана;
 H — матрица наблюдений.

Определение положения буксира. Положение буксира определяется с использованием данных от системы высокоточной навигации. Пусть (x_{GPS}, y_{GPS}) — координаты, полученные от GPS, а (x_{INS}, y_{INS}) — координаты от инерциальной навигационной системы [6]. Итоговые координаты вычисляются как взвешенная сумма:

$$x = w_{GPS} \cdot x_{GPS} + w_{INS} \cdot x_{INS}; \quad (8)$$

$$y = w_{GPS} \cdot y_{GPS} + w_{INS} \cdot y_{INS},$$

где w_{GPS} и w_{INS} — весовые коэффициенты, зависящие от точности источников.

Оценка параметров движения. Параметры движения (курс, скорость, углы крена и дифферента) оцениваются с использованием датчиков [9, 10]. Угловая скорость поворота ω вычисляется в виде

$$\omega = \frac{\Delta\psi}{\Delta t}, \quad (9)$$

где $\Delta\psi$ — изменение курсового угла за время Δt .

Взаимодействие АНС и ССО. АНС использует данные от ССО для принятия решений. Передача данных между системами описывается в виде

$$D_{АНС}(t) = f(D_{ССО}(t)), \quad (10)$$

где $D_{ССО}(t)$ — данные от ССО;
 $f(\cdot)$ — функция обработки данных.

Примером такой функции может быть фильтрация данных для устранения выбросов:

$$f(D) = \begin{cases} D, & \text{если } |D - \bar{D}| \leq \sigma; \\ \bar{D}, & \text{иначе} \end{cases} \quad (11)$$

где D — среднее значение;

σ — пороговое отклонение.

Система контроля и управления техническими средствами (СКУТС). Предназначена для контроля работы всех технических средств БА в реальном времени и управления исполнительными механизмами БА [7–АКБ10].

Требования к СКУТС:

- мониторинг состояния технических средств БА и передача этих данных в ССО;
- обеспечение бесперебойного управления всеми техническими средствами БА;
- возможность восстановления работы всех технических средств БА после сбоев (связи, питания) в режим готовности;
- обеспечение выполнения управляющих команд от АНС при автономном движении БА;
- обеспечение выполнения управляющих команд от модуля управления групповым поведением (МУГП) МУГП центра дистанционного управления (ЦДУ) для режима дистанционного управления БА и дистанционного / автономного управления движением ордера;
- обеспечение в аварийной ситуации выключения ВРК и перевод швартовых устройств в положение для буксировки (гидравлика выдвигается и опускается).

Система связи. Предназначена для обеспечения стабильной, безопасной и непрерывной связи БА с центром дистанционного управления (ЦДУ) и другими компонентами СОАПШ.

Система связи БА должна:

- иметь возможность многоканальной передачи данных — поддержка нескольких каналов связи (УКВ радиосвязь, сотовая сеть, Wi-Fi (WiMax), Ethernet (локальная сеть БА, береговая инфраструктура)) для увеличения надежности;

– автоматически переключаться на резервные каналы — в случае потери основного канала связи позволяет сохранять контакт с буксиром (например, при выходе из зоны действия сотовой связи или повреждении оборудования);

– обеспечивать конфиденциальность данных — все передаваемые данные, включая команды управления и телеметрию, шифруются для предотвращения их перехвата или несанкционированного вмешательства;

– обеспечивать предотвращение потери данных — при потере канала связи обеспечивает накопление данных, а при восстановлении канала связи система автоматически передает накопленные данные в ЦДУ, чтобы сохранить полную картину происходящего в журнале событий;

– передавать в ССО БА информации о состоянии всех каналов связи.

Пропульсивная система БА. Предназначена для обеспечения высокой маневренности БА и выполнения тяговых усилий в любом направлении¹ (рис. 3) [11].

Требования к пропульсивной системе БА:

– должно соблюдаться расположение ВРК в диаметральной плоскости буксира, что позволяет совершать тяговые усилия в любом направлении;

– 360-градусное управление направлением тяги — винторулевые колонки (ВРК) должны поворачиваться вокруг вертикальной оси на 360°, что позволяет изменять направление тяги и обеспечивает высокую точность маневрирования, включая возможность поворота вокруг своей оси;

– работа ВРК должна обеспечиваться электроприводом, что позволяет плавно регулировать мощность и направление тяги, обеспечивая высокую точность маневрирования и минимизацию задержек при смене направления движения;

– возможность раздельного управления каждой рулевой колонкой, благодаря которой в зависимости от задачи каждая ВРК может работать независимо (например, при одиночном движении для экономии заряда может работать только одна ВРК).



Рис. 3. Внешний вид пропульсивной системы БА

Система энергообеспечения. Предназначена для обеспечения бесперебойного электропитания всех систем БА (рис. 4) [9–11].

Требования к системе энергообеспечения:

– использование необслуживаемых аккумуляторных батарей (АКБ), повышающее надежность эксплуатации БА;

– использование тяговых АКБ, обеспечивающее устойчивое электропитание даже при длительной высокой нагрузке, что важно для выполнения задач буксировки судов;

– мониторинг состояния каждой ячейки АКБ — оснащение системы датчиками, которые позволяют отслеживать такие параметры, как напряжение, температура и уровень заряда каждой ячейки;

– наличие основного и резервного блоков АКБ — основной блок АКБ обеспечивает постоянную подачу электроэнергии на все системы буксира, резервный (аварийный) источник включается в случае выхода из строя основного, обеспечивая бесперебойное электроснабжение критически

¹ Hensen H. Tug use in port. A practical guide. 2-nd edition / H. Hensen. Port Rotterdam: Nautical Institute, 2003. — 192 p.; Tugs and Tows — A Practical Safety and Operational Guide. Luxembourg: The Shipowners' Mutual Protection and Indemnity Association, 2015. 90 p.

важных систем, управления движением и связи на время, необходимое для безопасного завершения текущей операции и перехода БА в аварийный режим.

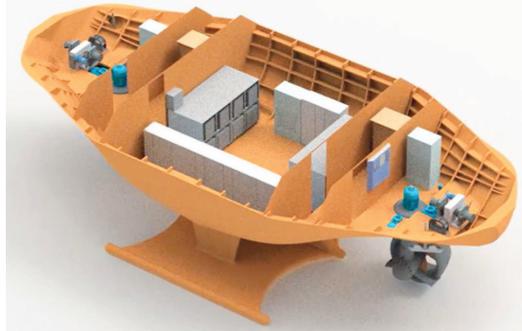


Рис. 4. Концептуальный пример реализации системы энергообеспечения в рамках требований Регистра РФ (центральный отсек занят системой АКБ и щитами)

Система жесткой сцепки БА. Предназначена для надежного и безопасного соединения БА с транспортным судном и местом стоянки (рис. 5) [12–14]. Может быть реализована с использованием двух поворотных швартовых устройств (ПШУ). Для стыковки с корпусом судна могут быть использованы ПШУ на основе различных технологий: магнитных, вакуумных, механических.

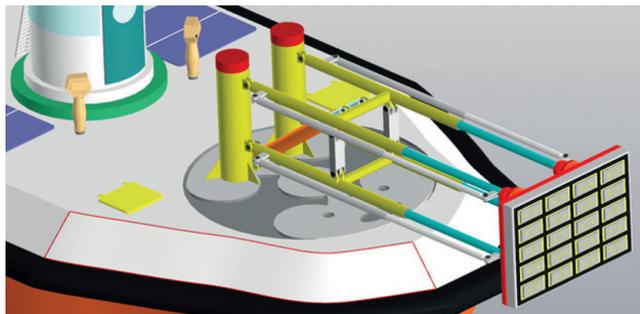


Рис. 5. Концептуальная реализация ПШУ на основе магнитов

Требования к системе жесткой сцепки БА:

- два ПШУ должны быть расположены на баке и корме БА, что позволяет совершать тяговые и толкательные усилия как при расположении лагом к транспортному судну, так и баком / кормой (стыковка одним ПШУ);
- каждый ПШУ должен иметь возможность поворачиваться в горизонтальной плоскости на 360°;
- ПШУ должно иметь не менее шести степеней свободы для компенсации вертикальных и боковых колебания БА;
- ПШУ должно иметь гидравлический привод для обеспечения плавности движения ПШУ и предотвращения повреждения корпуса транспортного судна, находящегося в жесткой сцепке с БА, от резкого изменения внешних воздействий;
- сила сцепления БА с судном не должна превышать тяговое усилие БА;
- удерживающее усилие должно быть равномерно распределено по секциям ПШУ.

Дополнительные требования к ПШУ с технологией магнитной стыковки:

- магнитная секция ПШУ должна обладать достаточной мощностью для удержания транспортного судна при работе на оттяжку;
- ПШУ должно иметь минимальную остаточную намагниченность, так как это обеспечивает безопасную отстыковку БА от судна, а также минимизирует риск воздействия магнитных полей на персонал при выполнении сервисных работ;

– магниты, используемые в ПШУ, должны иметь малую глубину проникновения магнитного поля, что исключает риск воздействия магнитного поля на бортовое оборудование, чувствительный к магнитному полю груз и экипаж транспортного судна.

Система аварийной буксировки БА. Предназначена для обеспечения безопасной буксировки неисправного БА другим БА в аварийных ситуациях [12].

Требования к системе аварийной буксировки БА:

- при аварийном режиме гидравлика неисправного БА должна выдвигаться и опускаться, обеспечивая таким образом возможность стыковки;
- в аварийном режиме ВРК буксируемого БА должны быть отключены;
- система аварийной буксировки должна позволять стыковаться с аварийным БА при отсутствии в нем питания.

Заключение (Conclusion)

В ходе выполнения работы на основании сформулированных требований к системам автономного БА были разработаны математические модели его ключевых систем, таких как автоматическая навигационная система и система ситуационной осведомленности. Для АНС предложены уравнения движения, методы корректировки маршрута и расчета параметров управления курсом и скоростью. Для ССО описаны алгоритмы объединения данных от различных источников, включая системы высокоточной навигации, АИС, РЛС и лаг. Интеграция данных реализована с использованием фильтра Калмана для повышения точности и достоверности информации.

Разработанные модели и алгоритмы обеспечивают высокую степень автоматизации процессов навигации и управления БА [15–18]. Это позволяет минимизировать риски столкновений, обеспечить безопасное расхождение с другими судами и выполнить точное маневрирование в стесненных условиях. Особое внимание уделено учету гидрометеорологических условий, навигационных опасностей и интенсивного судоходства.

Дальнейшие исследования с учетом опубликованных ранее работ могут быть направлены, например, на совершенствование алгоритмов искусственного интеллекта для анализа навигационной обстановки и принятия решений в реальном времени. Также представляется перспективным внедрение дополнительных датчиков и систем, таких как лидары и оптические системы анализа окружающей обстановки для повышения надежности работы ССО [19–23].

БА, оснащенный современными системами навигации, ситуационной осведомленности и энергообеспечения, представляет собой перспективное решение для автоматизации портовых операций. Реализация рассмотренных систем в группе исследованных в настоящей работе устройств и систем позволит повысить эффективность и безопасность эксплуатации буксиров-автоматов в сложных условиях плавания [16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент на полезную модель № 222507 Российская Федерация, МПК В63В 3/00. Корпус судна-буксира / В. Г. Сенченко, А. Б. Крючков, В. В. Заслонов; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова». — № заявл. 07.11.2023; опубл. 29.12.2023. — EDN TJCDAW.
2. *Биденко С. И.* О концептуальном облике буксира-автомата для работы в буксирном порядке или «стае» / С. И. Биденко, В. Г. Сенченко, А. Б. Васильев // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2021. — № 1–1. — С. 178. DOI: 10.52899/978-5-88303-611-7_170. — EDN MQZWRV.
3. *Биденко С. И.* О концептуальном облике буксира-автомата для работы в буксирном порядке или «стае» / С. И. Биденко, В. Г. Сенченко, А. Б. Васильев // Неделя науки Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. — 2021. — № 1–1. — С. 34. — EDN NVQFVE.
4. Патент 2809129 Российская Федерация, МПК В63Н 25/04, G05D 1/08, G08G 3/00. Способ проводки, швартовки и отшвартовки морского грузового судна в автономном режиме и способ работы цифровой

инструментальной платформы управления движением группы автономных судов-буксиров в портовой акватории / В. Г. Сенченко, М. А. Лопатин, Д. Е. Студеникин; заяв. и патентообл. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Государственный морской университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова». — № 2023102499 заявл. 03.02.2023; опубл. 07.12.2023. — EDN IEUNZK.

5. *Епихин А. И.* Проблемы внедрения безэкипажных судов на основе статистических исследований аварийных ситуаций и потерь судов / А. И. Епихин, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 3–1(53). — С. 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010. — EDN IKWJXK.

6. *Студеникин Д. Е.* Динамическое формирование коридора безопасности при планировании маршрута движения судна / Д. Е. Студеникин, С. И. Кондратьев, Е. В. Хекерт, М. А. Модина // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 2–4(52). — С. 128–131. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.081. — EDN RQCPEO.

7. *Лопатина В. В.* Методика проведения измерений геометрических перемещений подвижного объекта / В. В. Лопатина, В. Г. Сенченко // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–4(50). — С. 62–66. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.098. — EDN JCWMXP.

8. *Заслонов В. В.* Метод группового движения морских подвижных объектов / В. В. Заслонов, С. Н. Стуконог // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 2(111). — С. 76–84. DOI: 10.34046/aumsuomt111/13. — EDN OVAQNS.

9. *Zaslonov V. V.* Description of Sea Maneuvers Performed by a Group of Automatic Tugs Using the Flock Method / V. V. Zaslonov, V. G. Senchenko, A. A. Butsanets // Transportation Research Procedia. — 2022. — Vol. 61. — Pp. 347–353. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.056. — EDN LNPZXM.

10. *Дергилев В. А.* Реализация магистральных решений задач оптимизации управления судном на курсе в режиме автономного плавания / В. А. Дергилев, С. С. Жук // Транспортное дело России. — 2022. — № 4. — С. 149–153. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_149. — EDN DMVAXQ.

11. *Gaythwaite J. W.* Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels / J. W. Gaythwaite. — Reston: ASCE Press, 2004. — 564 p.

12. *Burylin I. V.* Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes / I. V. Burylin // Journal of Physics: Conference Series. — 2021. — Vol. 2061. — Is. 1. — Pp. 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012074. — EDN FWSZAF.

13. *Клюев В. В.* Участие Российской Федерации в разработке международных правовых инструментов в области автономного судоходства / В. В. Клюев, С. Д. Айзинов, Ю. С. Меленас [и др.] // Транспортное право и безопасность. — 2024. — № S1. — С. 9–267. — EDN NVFQUQ.

14. *Головина А. А.* Некоторые проблемы квалификации неокказания капитаном судна помощи, терпящим бедствие на море в условиях автономного судоходства / А. А. Головина, С. Я. Пензев, Л. Г. Бакулина // Вестник государственного морского университета имени адмирала Ф. Ф. Ушакова. — 2023. — № 1(42). — С. 107–111. — EDN YELOOO.

15. *Golovina A.* On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel / A. Golovina // SHS Web Conf. — 2022. — Vol. 134. — Pp. 00114. DOI: 10.1051/shsconf/202213400114. — EDN WPEUCZ.

16. *Бурылин Я. В.* Комплекс программно-аппаратных средств для решения задач автономного судоходства / Я. В. Бурылин, А. В. Гринек, И. П. Бойчук [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 4–1(58). — С. 68–74. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.025. — EDN VBEWWG.

17. *Буцанец А. А.* Исследование проблемы построения автоматизированной системы управления для обеспечения безопасного пропуска безэкипажных судов через судоходные шлюзы / А. А. Буцанец, Н. М. Ксенофонтов, Т. А. Волкова // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129. — EDN OQMZNO.

18. *Karetnikov V.* Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020. — Springer Nature Singapore, 2021. — С. 40–46. — EDN PHCRQD.

19. *Каретников В. В.* К вопросу разработки основных концептуальных положений системы дистанционного управления техническим флотом / В. В. Каретников, С. В. Рудых, А. А. Буцанец // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2019. — № 2. — С. 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15. — EDN KFIHYI.

20. *Karetnikov V.* Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator / V. Karetnikov, E. Ol'khovik, A. Butsanets, A. Ivanova // Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020 — Springer Nature Singapore, 2021. — С. 146–156. — EDN JJVLQH.

21. *Айзинов С. Д.* Принципы оценки функциональных свойств систем автономного судовождения / С. Д. Айзинов, А. А. Буцанец, С. В. Смоленцев [и др.] // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2024. — № 74. — С. 83–96. — EDN HNHFAA.

22. *Смоленцев С. В.* Проблема оценки навигационной ситуации в море / С. В. Смоленцев // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 6(34). — С. 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28. — EDN VCKKXN.

23. *Мосейко Е. С.* Многоуровневая система обеспечения надежности судовых механических систем на этапах жизненного цикла / Е. С. Мосейко, Е. О. Ольховик, В. Ю. Рудь // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783. — EDN FFKEEK.

REFERENCES

1. Senchenko, V. G., A. B. Kryuchkov and V. V. Zaslouov. RU 222 507 U1, B 63 B 3/00. Korpus sudnabuksira. Russian Federation, assignee. Publ. December 29, 2023.

2. Bidenko, S. I., V. G. Senchenko and A. B. Vasil'ev. "O About the conceptual appearance of the automatic tow for work in a towing order or "pack". " *Nedelya nauki Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta* 1–1 (2021): 178–178. DOI: 10.52899/978-5-88303-611-7_170.

3. Bidenko, S. I., V. G. Senchenko and A. B. Vasil'ev. "About the conceptual appearance of the automatic tow for work in a towing order or "pack". " *Week of Science of St. Petersburg State Maritime Technical University* 1–1 (2022): 34.

4. Moseyko, E. S., E. O. Ol'khovik and V. Yu. Rud'. "Method of guiding, mooring and unmooring sea cargo vessel in autonomous mode and method of operating digital instrumental platform for motion control of group of autonomous towing vessels in port water area." *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

5. Epikhin, A. I. and M. A. Modina. "Problems of introducing unmanned vessels on the basis of statistical studies of emergencies and ship losses." *Morskije intellektual'nye tekhnologii* 3–1(53) (2021): 77–82. DOI: 10.37220/MIT.2021.53.3.010.

6. Studenikin, D. E., S. I. Kondrat'ev, E. V. Khekert and M. A. Modina. "Dynamic formation of a safety corridor during preliminary vessel route planning." *Morskije intellektual'nye tekhnologii* 2–4(52) (2021): 128–131. DOI: 10.37220/MIT.2021.52.2.081.

7. Lopatina, V. V. and V. G. Senchenko. "Methodic of measuring of geometric displacements of a moving object." *Morskije intellektual'nye tekhnologii* 4–4(50) (2020): 62–66. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.098.

8. Zaslouov, V. V. and S. N. Stukonog. "The method of group movement of marine mobile objects." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 2(111) (2024): 76–84. DOI: 10.34046/aumsuomt111/13.

9. Zaslouov, V. V., V. G. Senchenko and A. A. Butsanets. "Description of Sea Maneuvers Performed by a Group of Automatic Tugs Using the Flock Method." *Transportation Research Procedia* 61 (2022): 347–353. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.01.056.

10. Dergilev, V. A. and S. S. Zhuk. "Implementation of trunk solutions to the problems of optimizing the management of the vessel on the course in the mode of autonomous navigation." *Transport Business Of Russia* 4 (2022): 149–153. DOI: 10.52375/20728689_2022_4_149.

11. Gaythwaite J. W. *Design of Marine Facilities for the Berthing, Mooring, and Repair of Vessels*. Reston: ASCE Press, 2004.

12. Burylin, I. V. "Interface for indication and remote control of an unmanned vessel in automatic and manual modes." *Journal of Physics: Conference Series* 2061.1 (2021): 012074. DOI: 10.1088/1742-6596/2061/1/012074.

13. Klyuev, V. V. et al. "Participation of the russian federation in the development of international legal instruments in the autonomous shipping." *Transportnoe pravo i bezopasnost' SI* (2024): 9–267.

14. Golovina, A. A., S. Ya. Penzev and L. G. Bakulina. "Some problem aspects of qualification of the ship's captain's fail to render assistance to persons in distress at sea under the conditions of autonomous navigation." *Vestnik gosudarstvennogo morskogo universiteta imeni admirala F. F. Ushakova* 1(42) (2023): 107–111.

15. Golovina, A. “On the issue of the legal status of persons exercising control of a maritime autonomous surface vessel.” *SHS Web Conf.* 134 (2022): 00114. DOI: 10.1051/shsconf/202213400114.
16. Burylin, Ya. V. et al. “Software and hardware complex for solving problems of autonomous navigation.” *Morskije intelektual’nye tekhnologii* 4–1(58) (2022): 68–74. DOI: 10.37220/MIT.2022.58.4.025.
17. Butsanets, A. A., N. M. Ksenofontov and T. A. Volkova. “Studying the problem of constructing an automated control system to ensure the safe passage of unmanned vessels through shipping locks.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1115–1129. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1115-1129.
18. Karetnikov, V., E. Ol’khovik, A. Butsanets and A. Ivanova. “Development of Methods for Maneuvering Trials of Autonomous Ships in Test Water Area.” *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020* Springer Nature Singapore, 2021: 40–46.
19. Karetnikov, V. V., S. V. Rudykh and A. A. Butsanets. “On the issue of developing conceptual statements of technical fleet remote control system.” *Vestnik Of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering And Technologies* 2 (2019): 7–15. DOI: 10.24143/2073-1574-2019-2-7-15.
20. Karetnikov, V., E. Ol’khovik, A. Butsanets and A. Ivanova. “Simulation of Maneuvering Trials of an Unmanned or Autonomous Surface Ship on a Navigation Simulator.” *Proceedings of the XIII International Scientific Conference on Architecture and Construction 2020* Springer Nature Singapore, 2021: 146–156.
21. Ayzinov, S. D. et al. “Principles for assessing the functional properties of systems for autonomous shipping.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 74 (2024): 83–96.
22. Smolentsev, S. V. “The problem of estimation of navigation situation in the sea.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 6(34) (2015): 23–28. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-6-23-28.
23. Moseyko, E. S., E. O. Ol’khovik and V. Yu. Rud’. “A multi-level system for ensuring the reliability of marine mechanical systems at the stages of the life cycle.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 775–783. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-775-783.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Заслонов Владимир Валерьевич —
мл. научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Автоматизация судовождения»
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адм. Ф. Ф. Ушакова»,
353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93,
e-mail: djdf3d@yandex.ru

Жук Сергей Сергеевич —
мл. научный сотрудник научно-исследовательской
лаборатории «Автоматизация судовождения»
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адм. Ф. Ф. Ушакова»,
353924, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93,
e-mail: serzh.zhuk.99@mail.ru

Ольховик Евгений Олегович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zaslonov, Vladimir V. —
researcher of the research laboratory
“Automation of Navigation”,
Admiral Ushakov
State Maritime University
93, Lenin’s avenue, Novorossisk, 353924,
Russian Federation
e-mail: djdf3d@yandex.ru

Zhuk, Sergei S. —
researcher of the research laboratory
“Automation of Navigation”
Admiral Ushakov
State Maritime University
93, Lenin’s avenue, Novorossisk, 353924,
Russian Federation
e-mail: serzh.zhuk.99@mail.ru

Ol’khovik, Evgeniy O. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: olhovikeo@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию: 11 июня 2025 г.
Received: June 11, 2025.