

СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ БЕЗЭКИПАЖНЫМ СУДНОМ ПРИ МАНЕВРИРОВАНИИ В СЛОЖНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ УСЛОВИЯХ

П. А. Гарибин¹, С. А. Кабанов²

¹ ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

² ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ»
им. Д. Ф. Устинова», Санкт-Петербург, Российская Федерация

В работе предложен алгоритм управления движением и прохождением безэкипажного судна навигационных опасностей в соответствии с Правилами плавания судов по внутренним водным путям Российской Федерации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения безопасности и эффективности движенических операций за счет внедрения автономных технологий при наличии на борту судна точной (без ошибок) информации о текущей ситуации. Управление осуществляется непосредственно на борту безэкипажного судна, т. е. автономно, а не по командам с берега. Задача оптимального управления решается для упрощенной модели центра масс подвижного объекта. Отмечается, что наличие необходимости принятия решения по управлению судном в реальном времени приводит к использованию как математических моделей, так и модели информационной. Продуктивным является применение самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией А. А. Красовского. В работе весовые коэффициенты ПИД-регулятора определяются из аналитических выражений, полученных для самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией. Предложены математические модели и алгоритмы для анализа навигационной обстановки и корректировки маршрута, а также рассмотрены методы интеграции данных. Сформирована математическая модель динамики, а также установлены алгоритмы оптимального управления, обеспечивающие безопасность безэкипажного судна. Разработана методология возможности маневрирования безэкипажного судна посредством автономного оптимального ситуационного управления с обходом зон навигационной опасности движения. Представлены результаты компьютерного моделирования динамики оптимального движения судна.

Ключевые слова: водоизмещающее судно, перекасты, управление движением, регулятор, реальное время, прогнозирующие модели, водные пути, автономность управления, компьютерное моделирование, оптимизация.

Для цитирования:

Гарибин П. А. Синтез оптимального управления безэкипажным судном при маневрировании в сложных навигационных условиях / П. А. Гарибин, С. А. Кабанов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. 2026. Т. 18. № 2. С. 272–283. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-272-283. — EDN KCHCNG.

SYNTHESIS OF OPTIMAL CONTROL FOR AN UNMANNED VESSEL DURING MANEUVERING IN COMPLEX NAVIGATIONAL CONDITIONS

P. A. Garibin¹, S. A. Kabanov²

¹ Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

² Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D. F. Ustinov,
St. Petersburg, Russian Federation

The paper proposes an algorithm for controlling the motion of an unmanned vessel and for navigating through navigational hazards in accordance with the Rules for Navigation on Inland Waterways of the Russian Federation. The relevance of the study is обусловлена the need to ensure the safety and efficiency of vessel operations through the implementation of autonomous technologies under the condition of availability of accurate onboard information about the current situation. Control is performed directly on board the unmanned vessel, i. e., autonomously, rather

than based on commands from the shore. The optimal control problem is solved for a simplified center-of-mass model of a moving object. It is noted that the requirement to make real-time decisions in vessel control leads to the use of both mathematical and information models. The application of A. A. Krasovsky's self-organizing optimal regulator with extrapolation is effective. In this work, the weighting coefficients of the PID controller are determined from analytical expressions obtained for the self-organizing optimal regulator with extrapolation. Mathematical models and algorithms are proposed for the analysis of the navigational situation, route correction, and data integration. A mathematical model of dynamics is developed, and optimal control algorithms ensuring the safety of the unmanned vessel are established. A methodology for maneuvering an unmanned vessel based on autonomous optimal situational control with avoidance of navigation hazard zones is developed. The results of computer simulation of optimal vessel motion are presented.

Keywords: displacement vessel, shoals, motion control, controller, real-time, predictive models, inland waterways, autonomous control, computer simulation, optimization.

For citation:

Garibin, Pavel A. and S. A. Kabanov. "Synthesis of optimal control for an unmanned vessel during maneuvering in complex navigational conditions." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 18.2 (2026): 272–283. DOI: 10.21821/2309-5180-2026-18-2-272-283.

Введение (Introduction)

Проблемам управления движением надводных судов посвящено большое число исследований. Так, например, в работах [1, 2] предложен синтез адаптивного управления роботизированным судном в условиях неопределенности. Работа [3] посвящена стабилизации оптимального управления автоматическим подводным аппаратом на траектории, формируемой по алгоритму с коррекцией структуры управления, полученной на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина.

Нелинейный характер гидродинамических сил и моментов, связанных с динамикой судна, наличие внешних возмущений, а также изменяющиеся условия окружающей среды затрудняют построение имитационной модели движения. В работе рассматривается динамика судна в сечении по ватерлинии. Оптимальная траектория движения формируется на основе уравнений динамики центра масс судна, исходя из минимизации целевого функционала, в подынтегральную часть которого входит штрафная функция для учета возникающих ограничений на траекторию. Для стабилизации судна на оптимальной траектории его центра масс угол закладки рулей вычисляется через кривизну траектории с привлечением самоорганизующегося оптимального регулятора с экстраполяцией (СОРЭ) А. А. Красовского [4].

На реках и искусственных каналах актуальным является вопрос о вынужденном маневрировании судов, особенно безэкипажных, при прохождении ими участков навигационных опасностей движения (например, перекаты, участки искусственных каналов и др.). В природе существуют наносы и движение песчаных гряд в дноуглубительных прорезях между перекатами. Раз в 5 лет по существующим прорезям выполняют эксплуатационные землечерпательные работы [5]. В настоящее время имеют место случаи маловодности судоходных рек с труднопрогнозируемым изменением рельефа дна. Все эти факторы усугубляют навигационную опасность движения судов.

Наносы в реке часто располагаются по направлению их перемещения, образуя косой поперечный вал в русле, который своим мелководьем затрудняет судоходство тем, что создает перекаты (рис. 1). Между перекатами находятся глубоководные участки реки — плесы. Степень сложности судождения по перекатам зависит от их свойств. Перекаты весьма разнообразны, они отличаются друг от друга расположением в русле, элементами в плане и профиле, а также гидрологическим режимом [5, 6].

Навигационные и проектные глубины канала зависят от принятого порядка движения судов, главных размерений расчетного судна, параметров внешних воздействий (ветер, течение, волнение), а также от габаритов прорези канала (рис. 2).

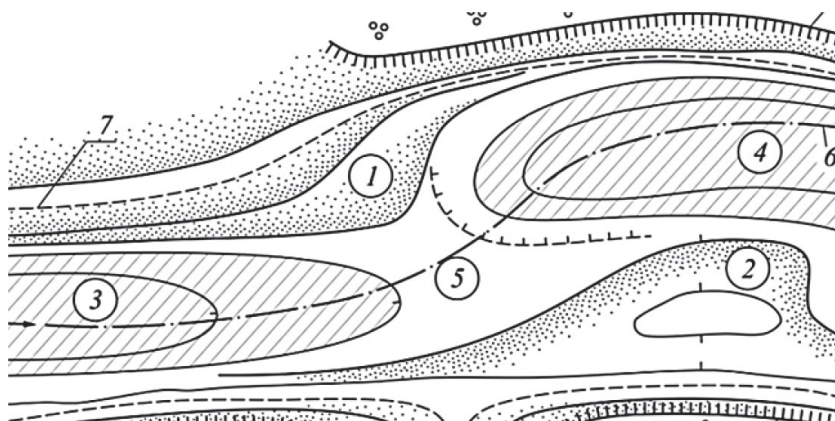


Рис. 1. План переката: 1 — верхний побочень; 2 — нижний побочень;
3 — верхняя плесовая ложина; 4 — нижняя плесовая ложина; 5 — корыто переката;
6 — ось судового хода; 7 — урез воды

Fig. 1. Shoal plan: 1 — upstream shoal margin; 2 — downstream shoal margin;
3 — upstream pool hollow; 4 — downstream pool hollow; 5 — shoal trough;
6 — fairway axis; 7 — water edge

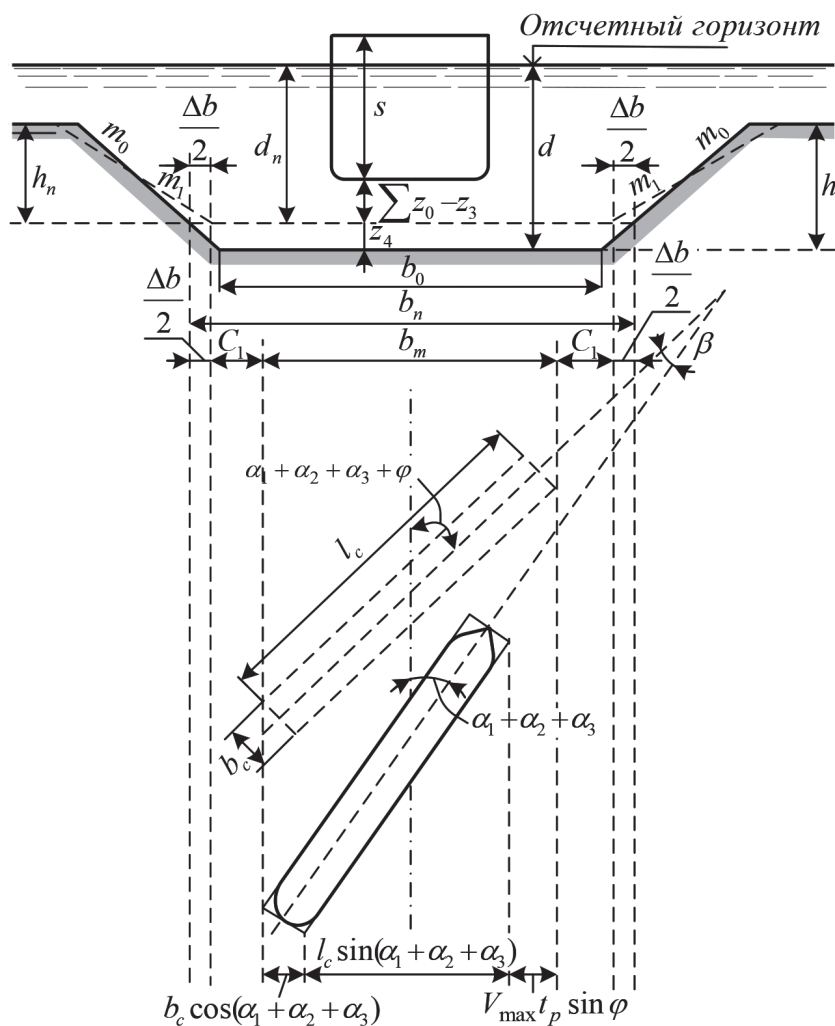


Рис. 2. Схема положения судна на прорези канала при определении ее габаритных размеров

Fig. 2. Diagram of vessel position in the channel cut when determining its overall dimensions

Ширина маневровой полосы b_m для расчетного судна определяется из выражения [2]:

$$b_m = l_c \sin(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + b_c \cos(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) + t_p \sin \varphi V_{\max}, \quad (1)$$

где α_1 — угол сноса судна от течения, град.; α_2 — угол дрейфа судна от ветра, град.; α_3 — угол сноса судна от волнения, град.; l_c и b_c — длина и ширина расчетного судна, м; t_p — время рыскания судна, с; φ — угол рыскания судна, град.

На практике величина $t_p \sin \varphi$ принимается постоянной и равной 3 с; $V_{\max}$ — максимальная скорость хода судна, м/с. Канал проектируется таким образом, чтобы суммарный угол сноса $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$ не превышал 25° . В противном случае считается, что судно теряет управляемость.

Ширина полосы канала $b_{пк}$, занимаемая судном на циркуляции, находится по наиболее удаленной точке A_1 и точке D_1 , которая при малых углах дрейфа находится на борту судна (рис. 3, а), а при больших — на носовой оконечности судна (рис. 3, б).

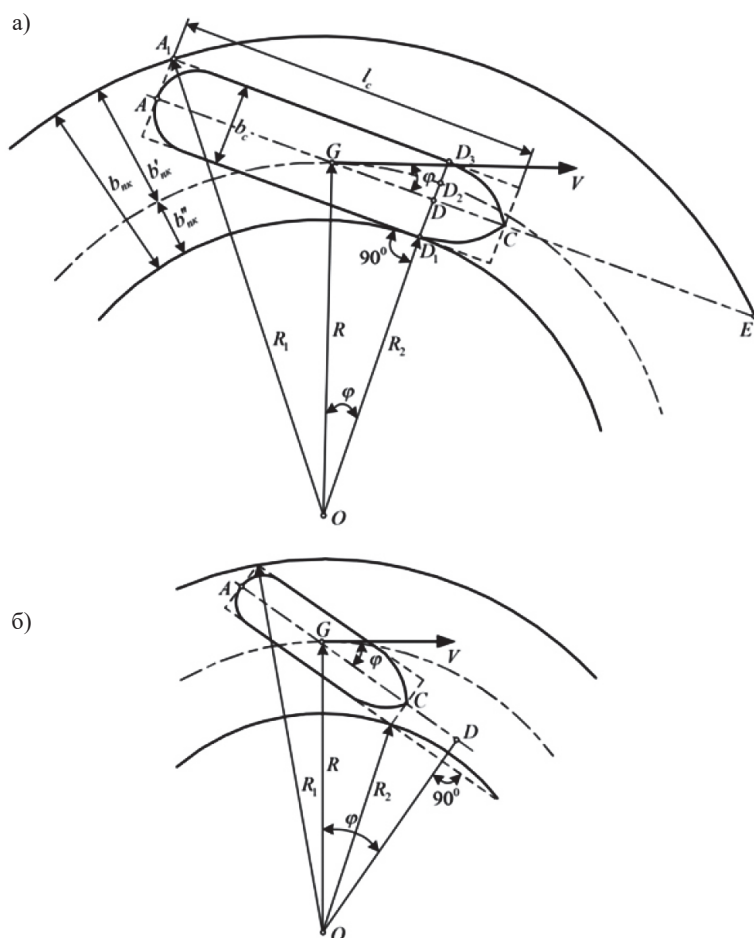


Рис. 3. Расчетные схемы для определения уширения на криволинейных участках канала полного профиля:
а — при малом угле дрейфа; б — при большом угле дрейфа
Fig. 3. Calculation schemes for determining channel widening on curved sections of a full-profile channel:
(a) at small drift angle; (b) at large drift angle

Предложенный в статье алгоритм основан на возможности оперативного оптимального управления судном с учетом в зависимости от внешних условий маневра путем использования прогнозирующих моделей движения центра масс судна. Стабилизация судна на выбранной траектории производится с использованием ПИД-регулятора, являющегося частным случаем СОРЭ. Управление осуществляется поворотом рулей направления для обеспечения минимума боковых отклонений судна от оптимальной траектории.

Представлены результаты компьютерного моделирования оптимального движения судна. Для судов представленный алгоритм реализован впервые. Работа имеет непосредственное практическое значение при посадках судов с экипажами на мель.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследована задача оптимального обхода безэкипажным судном препятствия в виде переката. В качестве целевого функционала рассмотрен критерий, в терминальную часть которого входят координаты конечной точки движения, в интегральную — функция штрафа за нарушение зоны навигационной опасности и затраты на управление. Использование функционала Красовского приводит к алгоритму с прогнозирующей моделью, реализуемого в реальном времени в темпе движения.

В качестве имитационной модели динамики судна рассмотрена следующая упрощенная система дифференциальных уравнений судна как твердого тела [7], без учета движений дифферента и крена:

$$\begin{aligned}\dot{V}_x &= \frac{1}{m_x} (R_x - m_z \omega_y V_z); \\ \dot{V}_z &= \frac{1}{m_z} (R_z + m_x \omega_y V_x); \\ \dot{\omega}_y &= \frac{1}{J_y} [M_y - V_x V_z (m_x - m_z)]; \\ \dot{\phi} &= \omega_y; \\ \dot{x}_g &= V_{xg} = V, \quad \dot{z}_g = V_{zg} = -V(\phi - \beta),\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь $V_g = [V_{xg} \ V_{zg}]^T$ — вектор скорости с проекциями на оси базовой системы координат (СК), $V = [V_x \ V_z]^T$ — вектор скорости с проекциями на оси связанной СК, $V = B_v V_g$ или $V_g = B_v^{-1} V$; B_v , B_v^{-1} — соответственно прямая и обратная матрицы перехода из базовой в связанную СК и наоборот:

$$B_v^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где ϕ — угол рыскания; $\beta = \arcsin \frac{V_z}{V}$ — угол дрейфа.

Приняты следующие допущения:

- линейная и угловая скорости движения определяются в связанной СК, начало которой совмещено с полюсом объекта (центром масс судна $x = z = 0$).
- корпус судна принимается подобным эллипсоиду вращения (координатные оси являются главными центральными осями инерции), $J_{xz} = 0$.
- матрица инерции судна D и матрица присоединенной массы жидкости Λ считаются диагональными.

Элементы Λ рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}& \text{– присоединенные массы } \lambda_{11} = k_{11} \rho v, \quad \lambda_{22} \approx \lambda_{33} = k_{22} \rho v; \\ & \text{– присоединенные моменты инерции } \lambda_{44} = k_{44} J_{xx}, \quad \lambda_{55} = \lambda_{66} = k_{66} J_{yy},\end{aligned}\quad (4)$$

где ρ — массовая плотность жидкости; v — объемное водоизмещение судна; k_{ii} — безразмерные коэффициенты, которые зависят от соотношения геометрических размеров судна и изменяются в пределах $k_{11} = 0,02 - 0,5$, а остальные — от 0 до 1,0 (при этом масса вытесненной жидкости в стационарных условиях движения совпадает с массой самого водоизмещающего судна: $\rho v = m$).

В данном случае суммарная матрица инерции $D + \Lambda$ является диагональной, а ее элементы имеют вид:

$$m_x = (1 + k_{11})m; m_z = (1 + k_{22})m; J_y = (1 + k_{66})J_{yy}. \quad (5)$$

Проекции главного вектора и главного момента гидродинамических сил на оси связанной СК имеют вид:

$$R_x = R - 0,5\rho V_r^2 S c_x; R_z = 0,5\rho V_r^2 S c_z; M_y = 0,5\rho V_r^2 S L m_y^0, \quad (6)$$

где $q = 0,5\rho V_r^2$ — скоростной напор; V_r — скорость потока жидкости, обтекающей корпус судна; S, L — соответственно характерные площадь и длина плавучего объекта; R — тяга двигателя; $c_x = c_{x0} + c_x^{\beta^2}\beta^2$ — безразмерный коэффициент гидродинамической силы сопротивления; $c_z = c_z^{\beta}\beta + c_z^{\delta}\delta$ — безразмерный коэффициент поперечной гидродинамической силы; $m_y^0 = m_y^{\beta}\beta + m_y^{\delta}\delta$ — безразмерный коэффициент гидродинамического момента рыскания.

Таким образом, представлена имитационная модель судна, динамика которого оптимизирована в следующем разделе статьи.

Результаты (Results)

Рассмотрим уравнения движения центра масс судна в горизонтальной плоскости, записанные через кривизну траектории K [3, 8]:

$$\dot{\varphi} = vK; \dot{x} = v\cos\varphi; \dot{z} = -v\sin\varphi; \dot{v} = agn_x; \dot{K} = u_1, \quad (7)$$

где $X = (\varphi \ x \ z \ v \ K)^T$ — вектор состояния; φ — угол рыскания; x, z — линейные координаты центра масс объекта в горизонтальной плоскости; v — скорость объекта.

Введение обозначения кривизны траектории K упрощает реализацию алгоритма в программном комплексе. Кривизна определяется в виде $K = -ag n_x / v^2$, где $n_x = (R - bv^2)/m$ и n_z — соответственно продольная и боковая составляющие перегрузки; $b = c_x \rho_j S / 2$; c_x — коэффициент лобового сопротивления; ρ_j — плотность среды; S — характерная площадь (миделя); $a = 1 - \frac{A}{mg} = 1 - \frac{m_j}{m}$; $A = \rho_j g V_n$ — сила Архимеда ($H = \text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2$); ρ_j — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; V_n — объем погруженной части тела, м^3 ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

Примем $u = (u_1 \ u_2)^T$, где u_1 отвечает за изменение направления движения, а $u_2 = R$ — за скорость. На левом конце траектории (при $t = t_0$) задаются начальные значения $\varphi(t_0) = \varphi_0$, $x(t_0) = x_0$, $z(t_0) = z_0$, $v(t_0) = v_0$, $K(t_0) = K_0$, на правом конце — конечные φ_f , x_f , z_f , v_f , K_f . При этом минимизируется целевой функционал, в общем случае имеющий терминальную и интегральную составляющие:

$$I = V_f(x, t_f) + \int_{t_0}^{t_f} f_0(x, u, t) dt, \quad (8)$$

где V_f, f_0 — заданные положительно определенные функции своих аргументов, имеющие непрерывные частные производные по x, t , а функция f_0 также и по u .

Примем $V_f = 0,5\Delta x_f^T \rho \Delta x$, $\Delta x_f = x(t_f) - x_f$, $f_0 = f_s + 0,5u^T k^{-1}u$, $\rho = \text{diag}(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_5)$, $k = \text{diag}(k_1^2, k_2^2)$; f_s — функция штрафа за попадание центра масс объекта в запретную область в виде круга радиуса r с центром в заданной точке:

$$f_s = \begin{cases} \frac{1}{2} M \left[(x - x_r)^2 + (z - z_r)^2 \right], & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2; \\ 0, & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 > r^2, \end{cases} \quad (9)$$

где x_g, z_g — координаты центра окружности; x_r, z_r — координаты точек окружности, x, z — координаты центра масс объекта (например, перекаты на реке; в данном случае гипотетически полагается, что форма переката представлена кругом радиуса r).

В зависимости от ситуации можно доопределить

$$f_s = \frac{1}{2} M \left[(x - x_r)^2 + (z - z_r)^2 \right] \left[\pm \text{sign}(z - z_r) \right], \quad (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2. \quad (10)$$

Задача состоит в оптимизации динамики системы (7) по критерию (8), которая сводится к принципу максимума, реализация которого сопряжена с решением двухточечной краевой задачи, численное решение которой затруднено необходимостью подходящего начального приближения для начальных значений вектора сопряженных переменных $p(t_0)$.

Для оптимизации процесса в реальном времени рассмотрим целевой функционал в виде критерия А. А. Красовского [9]:

$$I_1 = I + 0,5 \int_{t_0}^{t_f} u_o^T k^{-1} u_o dt, \quad (11)$$

где u_o — оптимальное значение управления u .

Представим гамильтониан H в виде

$$H = p_\phi v K + p_x v \cos \phi - p_z v \sin \phi + p_K u + 0,5 (u^T k^{-1} u + u_o^T k^{-1} u_o) + f_s. \quad (12)$$

Запишем уравнения для сопряженных переменных:

$$\begin{aligned} \dot{p}_\phi &= -\frac{\partial H}{\partial v} = p_x \sin \phi + p_z \cos \phi, \quad \dot{p}_x = -\frac{\partial H}{\partial x} = -\frac{\partial f_s}{\partial x} = \begin{cases} -M(x - x_r), & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2; \\ 0, & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 > r^2; \end{cases} \\ \dot{p}_z &= -\frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial f_s}{\partial z} = \begin{cases} -M(z - z_r), & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 < r^2; \\ 0, & (x - x_g)^2 + (z - z_g)^2 > r^2; \end{cases} \\ \dot{p}_v &= -\frac{\partial H}{\partial v} = -p_\phi K - p_x \cos \phi + p_z \sin \phi + 2p_v b v, \quad \dot{p}_K = -\frac{\partial H}{\partial K} = -p_\phi v. \end{aligned} \quad (13)$$

Из условия $\frac{\partial H}{\partial u} = 0$ определим оптимальное управление:

$$u_{1o}(t) = -k_1^2 p_K(t), \quad u_{2o}(t) = -k_2^2 p_v(t) / m.$$

Здесь $p = (p_\phi \ p_x \ p_z \ p_v \ p_K)^T$ — вектор сопряженных переменных, граничные значения которых определяются из условий трансверсальности в виде:

$$\begin{aligned} p_\phi(t_f) &= \frac{\partial V_f}{\partial \phi} = \rho_1 \Delta \phi_f = \rho_1 [\phi(t_f) - \phi_f], \quad p_x(t_f) = \rho_2 [x(t_f) - x_f]; \\ p_z(t_f) &= \rho_3 [z(t_f) - z_f], \quad p_v(t_f) = \rho_4 [v(t_f) - v_f]; \\ p_K(t_f) &= \rho_5 [K(t_f) - K_f]. \end{aligned}$$

Алгоритм управления с прогнозирующей моделью состоит из приведенной последовательности действий [8, 9], выполняемых на каждом шаге:

1. Интегрируется в прямом (ускоренном) времени система уравнений (7) прогнозирующей модели (при $u = 0$) при начальном условии $x(t)$ на интервале $[t, t_f]$.
2. При найденном $x(t_f)$ определяются граничные условия для $p(t_f)$.
3. При полученных граничных условиях $x(t_f)$, $p(t_f)$ в обратном (ускоренном) времени на интервале $[t_f, t]$ интегрируются уравнения (7), (13) и определяется вектор $p(t)$.
4. Рассчитывается управление $u_{1o}(t) = -k_1^2 p_K(t)$, $u_{2o}(t) = -k_2^2 p_v(t) / m$.
5. Интегрируется исходная система (7) при $u_{1o}(t) = -k_1^2 p_K(t)$, $u_{2o}(t) = -k_2^2 p_v(t) / m$ на один шаг при постоянном значении выбранного управления с получением $x(t + \Delta t)$.

6. Далее при условии $t + \Delta t < t_f$ процесс вычислений продолжается на следующем шаге алгоритма начиная с пп. 1. Этот алгоритм с прогнозирующей моделью позволяет добиться компромиссного по точности конечного положения, определяемого весовыми коэффициентами ρ_i , $i = \overline{1, n}$. В данном случае также можно корректировать величину интервала оптимизации, введя третье управление $u_3(t) = i_f$. Тогда вектор управления примет вид $u = (u_1 \ u_2 \ u_3)^T$. В гамильтониан добавляется слагаемое $p_i u_3$, оптимальное управление определится выражением $u_{30}(t) = -k_3^2 H(t_f)$. Начальные условия: $\varphi(t_0) = \varphi_0$, $x(t_0) = x_0$, $z(t_0) = z_0$, $v(t_0) = v_0$, $K(t_0) = K_0$. Задаются конечные требования: φ_f , x_f , z_f , v_f , K_f . Для штрафной функции круга: $x_g = 1100$ м, $z_g = 0$, радиус $r = 10$ м.

Алгоритмы отработки оптимальных траекторных задающих воздействий могут строиться на основе различных систем стабилизации. Продуктивным является применение СОРЕ А. А. Красовского [4].

В данном исследовании для стабилизации в целях упрощения применен частный случай СОРЕ — пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор.

$$u = r_1 + r_2 \int_0^t e d\tau + r_3 \dot{e}. \quad (14)$$

Если решать обратную задачу оптимизации с целью получения целевого функционала для управления в виде ПИД-регулятора, то оказывается, что нужно использовать СОРЕ. В [10] показано, что ПИД-регулятор является частным случаем СОРЕ. При этом измеряется интеграл

$$z(t) = \int_0^t e dt \quad (15)$$

от рассогласования e в трех точках, а информационный полином выбирается без самоорганизации, аппроксимирующий в виде параболы.

Оптимальное управление по критерию А. А. Красовского (11): $V_f = 0,5\beta_1 x_1^2(t_c)$, $f_0 = 0,5\beta_2 x_1^2(t_c) + 0,5k_p^{-1}(u^2 + u_0^2)$, $t_0 = 0$, $t_f = t_c$, $x_1 = z$) формируется регулятором в виде $u = -k_p p_{i+1}$, где β_1 , β_2 , t_c заданы, а сопряженные переменные определяются в виде [5]:

$$p_j = \frac{t_c^{j-1}}{(j-1)!} \sum_{i=0}^l a_i t_c^i \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 t_c}{l+i} \right). \quad (16)$$

Здесь u — управление, где l — порядок полинома ($l = 2$), так как используется парабола; β_1 , β_2 , k_p — весовые коэффициенты в целевом функционале; t_c — интервал оптимизации, a_i , $i = 0, 2$ — коэффициенты полинома $z(t) = a_2 + a_1 t + a_0$.

В этом частном случае структура управления совпадает со структурой ПИД-регулятора, а коэффициенты ПИД-регулятора вычисляются однозначно через коэффициенты функционала и величину интервала оптимизации [10]:

$$r_1 = \frac{1}{24} k_p \beta_2 t_c^4; \quad r_2 = -k_p \frac{t_c^2}{2} \left(\beta_1 + \frac{\beta_2 t_c}{3} \right); \quad r_3 = -\frac{1}{120} k_p \beta_2 t_c^5. \quad (17)$$

В работе стабилизация судна на оптимальной траектории его центра масс решалась с помощью СОРЕ (ПИД-регулятора): $\delta = \delta_0 + u_{\text{ПИД}} = \delta_0 + l_1 K_\Delta + l_2 \int_0^t K_\Delta dt + l_3 \dot{K}_\Delta$, $\delta_0 = \frac{-mv^2 K + R \sin \beta}{q S c_z^\delta} - \frac{c_z^\beta \beta}{c_z^\delta}$, $K_\Delta = K_c - K_{\text{им}}$; K_c — кривизна траектории центра масс (система (7)); $K_{\text{им}}$ — кривизна траектории имитационной модели (система (2)).

На рис. 4 представлена траектория движения судна при оптимизации по критерию А. А. Красовского, на рис. 5 — соответствующая схема движения. На рис. 6 представлен график зависимости $t_f(t)$, который подтверждает гибкость алгоритма при смене условий плавания.

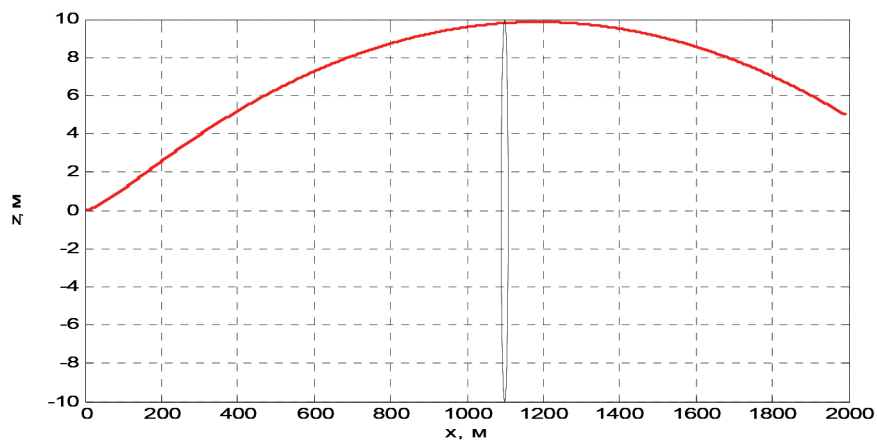


Рис. 4. Траектория движения судна при оптимизации по критерию А. А. Красовского
Fig. 4. Vessel trajectory under optimization according to the Krasovsky criterion



Рис. 5. Схема движения судна
(<https://fleetphoto.ru/photo/00/81/12/81126.jpg>)
Fig. 5. Vessel motion diagram

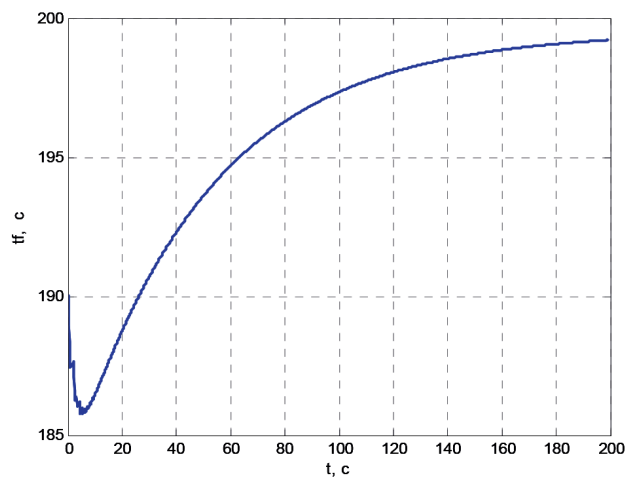


Рис. 6. График зависимости $t_f(t)$
Fig. 6. Dependence graph $t_f(t)$

Размеры судна, а также численные параметры задачи имеют демонстрационный характер, что позволяет оценить их адекватность. Например, при смене координат конечной точки алгоритм успешно осуществляет синтез управления и автоматически корректирует время движения (интервал оптимизации).

В работе [10] аналогично производилась стабилизация автоматического подводного аппарата на оптимальной траектории, формируемой по алгоритму с коррекцией структуры управления, полученной на основе принципа максимума Л. С. Понтрягина. В работе [11] решалась задача оптимизации управления процессом выравнивания уровней воды между камерой судоходного шлюза с распределением воды и бьефом с использованием алгоритма с прогнозирующей моделью.

Обсуждение (Discussion)

При движении судна при действии возмущений и зон навигационной опасности движения приходится использовать достаточно сложные математические модели движения. Непосредственно применить к ним методы оптимального управления не представляется возможным. Как правило, задача оптимального управления решается для упрощенной модели центра масс подвижного объекта. Далее следует решение задачи стабилизации объекта на сформированной траектории.

Построение линеаризованных моделей судна в отклонениях и решение задачи оптимальной стабилизации требует больших вычислительных затрат. Необходимость принимать решение по управлению судном в реальном времени приводит к использованию вместо математической модели информационной, что реализовано в СОРЭ А. А. Красовского. В данной статье весовые коэффициенты ПИД-регулятора определяются из аналитических выражений, полученных для СОРЭ. Результаты моделирования подтверждают работоспособность представленных алгоритмов.

Заключение (Conclusion)

В работе приведены доказательства возможности маневрирования безэкипажного судна в сложных навигационных условиях посредством синтеза оптимального управления. Результаты проведенного исследования имеют практическое значение в области эксплуатации внутренних водных путей.

В дальнейшем необходимо проведение исследования по формированию модели измерений с оценкой вектора состояния (с учетом интеграции данных от измерителей) посредством фильтра Калмана.

Целесообразно также рассмотреть вопрос о возможности подведения судна к подходному каналу шлюза с выбором иерархии из двух целевых функционалов [8], где верхний уровень отвечает за угол подхода судна к цели после обхода сложного участка движения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власов С. М. Алгоритмы адаптивного и робастного управления по выходу роботизированным макетом надводного судна / С. М. Власов, О. И. Борисов, В. С. Громов [и др.] // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2016. — Т. 17. — № 1. — С. 18–25. — EDN VKQQMT. DOI: 10.17587/mau.17.18–25.
2. Мовчан И. М. Разработка системы динамического позиционирования для маломерного судна / И. М. Мовчан, Д. А. Оськин, А. А. Горшков // Вестник Морского государственного университета. — 2023. — № 92. — С. 4–7. — EDN XIZICG.
3. Кабанов Д. С. Синтез алгоритма оптимального программно-позиционного управления многорежимным автоматическим подводным аппаратом / Д. С. Кабанов // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2014. — № 1. — С. 60–66. — EDN RTVYAD.
4. Красовский А. А. Адаптивный оптимальный регулятор с переменным порядком наблюдателя и временем экстраполяции / А. А. Красовский // Автоматика и телемеханика. — 1994. — Т. 11. — С. 97–112.
5. Каретников В. В. Лимитирующие навигационно-гидрографические факторы при использовании 3D электронных навигационных карт для управления судном при прохождении шлюзов / В. В. Каретников, А. А. Прохоренков, Ю. Г. Андреев // Вестник государственного университета морского и речного

флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 6. — С. 825–836. — EDN HXSMKV. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836.

6. Галеев Р. Э. Повышение навигационной безопасности маневрирования судов на внутренних водных путях на основе реализации технологии дополненной реальности: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. Э. Галеев. — Нижний Новгород: Волжский государственный университет водного транспорта, 2024. — EDN IQWNXQ.

7. Karetnikov V. Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways / V. Karetnikov, G. Chistyakov, E. Ol'khovik // E3S Web Conf. — 2020. — Vol. 157. — Pp. 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.

8. Пелевин А. Е. Методика построения модели движения судна и синтез алгоритмов управления на ее основе / А. Е. Пелевин, А. В. Лопарев, Е. В. Лукоянов, А. М. Столярова // Гирскопия и навигация. — 2025. — Т. 33. — № 1(128). — С. 52–63. — EDN GEUEZD.

9. Литов Д. В. Некоторые аспекты построения структуры системы управления морского автономного и дистанционно управляемого надводного судна (МАНС) / Д. В. Литов, О. С. Хватов // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2025. — № 78. — С. 35–43. — EDN YRHQTS.

10. Буцанец А. А. Организация системы дистанционного управления беспилотным техническим флотом для обеспечения судоходства на внутренних водных путях: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук; специальность: 05.22.19 «Эксплуатация водного транспорта, судовождение» / А. А. Буцанец. — Санкт-Петербург: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2021. — EDN MFMQJR.

11. Гарибин П. А. Управление процессом выравнивания уровней воды между камерой судоходного шлюза с распределением воды и бьефом / П. А. Гарибин, С. А. Кабанов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 4. — С. 555–562. — EDN FKPVXA. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-555-562.

REFERENCES

1. Vlasov, S. M., O. I. Borisov, V. S. Gromov et al. “Algorithms of adaptive and robust output control for a robotic prototype of a surface vessel.” *mEchatronics, Automation, Control* 17.1 (2016): 18–25. DOI: 10.17587/mau.17.18–25.

2. Movchan, I. M., D. A. Os'kin and A. A. Gorshkov. “Development of a dynamic positioning system for a small vessel.” *Bulletin of The Maritime State University* 92 (2023): 4–7.

3. Kabanov, D. S. “Optimal real-time control algorithm design for multimode automatic underwater vehicle.” *mEchatronics, Automation, Control* 1 (2014): 60–66.

4. Krasovskiy, A. A. “Adaptivnyy optimal'nyy regul'yator s peremennym por'yadkom nablyudatelya i vremem ekstrapolyatsii.” *Automation and Remote Control* 11 (1994): 97–112.

5. Karetnikov, V. V., A. A. Prokhorenkov and Yu. G. Andreev. “Limiting navigational and hydrographic factors when using 3d electronic navigation charts for ship handling during locks passage.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.6 (2024): 825–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-6-825-836.

6. Galeev, R. E. *Povyshenie navigatsionnoy bezopasnosti manevrirovaniya sudov na vnutrennikh vodnykh putyakh na osnove realizatsii tekhnologii dopolnennoy real'nosti*. PhD diss. Nizhnij Novgorod, 2024.

7. Karetnikov, V., G. Chistyakov and E. Ol'khovik. “Tasks of developing the aquatory for testing autonomus ships in inland waterways.” *E3S Web Conf.* 157 (2020): 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202015702010.

8. Pelevin, A. E., A. V. Loparev, E. V. Lukoyanov and A. M. Stolyarova. “Procedure for Constructing the Ship Motion Model and Synthesizing Model-Based Control Algorithms.” *Gyroscopy and Navigation* 16.1 (2025): 34–40. DOI: 10.1134/S2075108725700105.

9. Litov, D. V. and O. S. Khvatov. “Some aspects of control system structure building for maritime autonomous and remotely controlled surface ships (MASS).” *Nauchno-tekhnicheskij sbornik Rossiyskogo morskogo registra sudokhodstva* 78 (2025): 35–43.

10. Butsanets, A. A. *Organizatsiya sistemy distantsionnogo upravleniya bespilotnym tekhnicheskim flotom dlya obespecheniya sudokhodstva na vnutrennikh vodnykh putyakh*. PhD diss. St. Petersburg, 2021.

11. Garibin, P. A. and S. A. Kabanov. “Control of the water leveling process between the shipping lock chamber with water distribution and the pool.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.4 (2022): 555–562. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-4-555-562.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Гарибин Павел Андреевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Кабанов Сергей Александрович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Балтийский государственный
технический университет «ВОЕНМЕХ» им.
Д. Ф. Устинова»
190005, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
1-я Красноармейская ул., 1
e-mail: kaba-sa@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Garibin, Pavel A. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: garibin@mail.ru, kaf_gsk@gumrf.ru

Kabanov, Sergei A. —

Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Baltic State Technical University “VOENMEH”
named after D. F. Ustinov
1, 1-ya Krasnoarmeiskaya Str.,
St. Petersburg, 190005,
Russian Federation
e-mail: kaba-sa@mail.ru

Статья поступила в редакцию 11 января 2026 г.

Received: January 11, 2026.