

# ПРИНЦИПЫ ЗАДАНИЯ И ОТСЛЕЖИВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИ РЕЛИЗУЕМОГО МАРШРУТА

**А.С. Васьков**

*ФГОУ ВПО ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова*  
Россия, 353918, Новороссийск, Ленина пр., 93  
E-mail: [as.vaskov@mail.ru](mailto:as.vaskov@mail.ru)

**А.А. Мироненко**

*ФГОУ ВПО ГМУ им. адмирала Ф.Ф. Ушакова*  
Россия, 353918, Новороссийск, Ленина пр., 93  
E-mail: [alex\\_mironenko@mail.ru](mailto:alex_mironenko@mail.ru)

**Ключевые слова:** судовождение, управление судном, маршрут, сигмоидальная траекторная функция, отслеживание маршрута.

**Аннотация:** рассматривается подход к заданию маршрута судна сигмоидальными функциями. Предлагается способ согласованного изменения кинематических параметров движения, рассматриваются варианты реализации системы отслеживания запланированного маршрута, приводятся результаты компьютерного моделирования процессов. Методы могут найти применение в современных навигационных, интеллектуальных системах, при разработке схем маневрирования в стесненных, портовых водах.

## 1. Введение

Проблема планирования маршрута и режима движения подвижных объектов (судна) являются предметом множества исследований [1-5, 7-9], остается актуальной [10, 11] и представляет основу автономной и интеллектуальной навигации. Анализ исследований показывает общность решений – декомпозицию фундаментальной проблемы на взаимосвязанные подзадачи:

- 1) Формализация района и условий плавания, навигационной обстановки [2, 7, 12]. Для этих целей перспективны подходы на основе теории графов, учитывающие навигационные опасности, особенности плавания, другие факторы.
- 2) Планирование физически реализуемого маршрута и режима движения из начального в целевое положение, учитывая ориентацию, маневренные качества, другие особенности подвижного объекта с заданной гладкостью программных режимов движения без перегрузок исполнительных механизмов [1-4, 7-9].
- 3) Генерирование, отслеживание программных движений в систему управления по принципу «невозмущенного-возмущенного движения» Ляпунова-Летова [9] для малых отклонений, и коррекция программных движений при значительных отклонениях.

## 2. Принцип задания маршрута судна

При представлении маршрута судна графом [2, 7], ребра могут задаваться любыми аналитическими выражениями, тогда цель управления движением формулируется уравнениями, связывающими координаты управляемого объекта [5]. По теореме А.Н.Колмогорова и В.И.Арнольда маршрут, как непрерывная функция  $n$ -переменных может быть получен с помощью операций сложения, умножения и суперпозиции непрерывных функций одного переменного (управляемого параметра), которые, по теореме Вейерштрасса равномерно приближаются последовательностью полиномов, т.е.

$$(1) \quad \Pi_i^c = \Pi_0 + \int_0^s g_{\Pi_i} ds \cong \Pi_0 + ds \sum_1^N g_{\Pi_i}^c; g_{\Pi} \equiv \frac{d\Pi}{ds}; \Pi^c = \langle \psi, \alpha, V_g \rangle; c = \langle \delta, n \rangle,$$

где  $\Pi$  – соответствующий кинематический параметр движения судна;  $0, i, c$  – индексы начального, текущего значений и управляющего воздействия;  $g_{\Pi}$  – градиент по кинематическому параметру;  $N$  – количество аппроксимирующих выражений;  $n$  – частота вращения винта;  $s$  – пройденное расстояние;  $\delta$  – угол перекаладки руля;  $\psi$  – курс судна;  $\alpha$  – угол дрейфа;  $V_g$  – скорость судна в системе координат, связанной с Землей.

В результате анализа, экспериментальных исследований и математического моделирования движений судов [7] получена универсальная аппроксимирующая сигмоидальная траекторная функция (СТФ) и способы задания ее параметров:

$$(2) \quad \begin{aligned} \Pi^c &= (\Pi_{max}^c - \Pi_0^c) / \left( 1 + \exp(4g_{\Pi_{mn}^c} R_{\Pi}^c (S_{\Pi}^c + \Delta S_{\Pi}^c - S_i)) / (\Pi_{max}^c - \Pi_0^c) \right); \\ \Delta S_{\Pi}^c &= 0,25 \Pi_{max}^c \ln(\Pi_{max}^c / \Pi_i^c - 1) / g_{\Pi_{mn}^c}; \\ R_{\Pi}^c &= 1 + 3K_{\Pi} \exp(-\text{sgn}(c) 3(S_i - S_{\Pi}^c) / \Delta S_{\Pi}^c) / \Delta S_{\Pi}^c, \end{aligned}$$

где  $mn, max$  – индексы значений параметров в средней точке периода маневра, их максимальные значения;  $\Delta S_{\Pi}^c$  – поправка за смещение СТФ из начальных условий маневра;  $S_{\Pi}^c$  – расстояние до точки перегиба СТФ;  $R_{\Pi}^c$  – изменение наклона СТФ от управляющего воздействия;  $K_{\Pi}$  – коэффициент, определяющий  $R_{\Pi}^c$ , после приложения управляющего воздействия.

## 3. Принцип согласования кинематических и динамических параметров

Причинно-следственные связи изменения элементов СТФ (2) от управляющих воздействий представляются также сигмоидальными функциями [7]:

$$(3) \quad \begin{aligned} \Pi^{\delta i} &= 2\Pi^{\delta max} / \left( 1 + \exp(-2k_{\Pi} (\delta_i + \Delta\delta) / \Pi^{\delta max}) \right) - \Pi^{\delta max}; \\ \Delta\delta &= \delta_{min} \left( 2 / \left( 1 + \exp(-2\delta_i k_{\delta} \delta_{min}^{-1}) \right) - 1 \right), \end{aligned}$$

где  $k_{\delta}, k_{\Pi}$  – коэффициенты, соответствующие углу наклона аппроксимирующей функции при малых перекаладках руля;  $min$  – минимальные значения управляющих воздействий, при которых сохраняется управляемость судна.

Поскольку после приложения управляющего воздействия изменяются все кинематические параметры горизонтального движения судна, предлагается принцип согласованного их задания, например изменение курса и скорости, после перекаладки руля:

$$(4) \quad \Delta V^{\delta} = \Delta V^{\delta max} \left( 2 \left( 1 + \exp \left( \frac{g_{\psi^{\delta max}} k_{\Delta V}}{\Delta V^{\delta max} k_{g_{\psi}}} \ln \left( \frac{2g_{\psi^{\delta max}}}{g_{\psi^{\delta i}} - g_{\psi^{\delta max}}} - 1 \right) \right) \right)^{-1} - 1 \right).$$

#### 4. Принципы отслеживания маршрута судна

Отслеживание системой управления судна заданного маршрута предлагается решать на принципах иерархии, на верхнем уровне компенсацией отклонений фактических от программных координат с динамикой, заданной уравнениями второго порядка, в целях непрерывности и гладкости переходных процессов [2, 7]:

$$(5) \quad \ddot{\Delta}_x + k_{x1}\dot{\Delta}_x + k_{x0}\Delta_x = 0; \quad \ddot{\Delta}_y + k_{y1}\dot{\Delta}_y + k_{y0}\Delta_y = 0;$$

где  $\Delta_x, \Delta_y$  – отклонения фактических от программных координат;  $k_{xi}, k_{yi}$  – коэффициенты переходных процессов;  $X_g, Y_g$  – координаты в системе координат, связанной с Землей.

По отклонениям текущих от программных координат (5) определяются требуемые скорости движения судна для возвращения на запланированный маршрут [2, 7]:

$$(6) \quad \dot{X}_g^T = \dot{X}_n + k_{x1}^{-1} (\ddot{X}_n - \ddot{X}_g + k_{x0}(X_n - X_g)); \quad u^T = \cos(\varphi - \psi) \sqrt{\dot{X}_g^T{}^2 + \dot{Y}_g^T{}^2};$$

$$\dot{Y}_g^T = \dot{Y}_n + k_{y1}^{-1} (\ddot{Y}_n - \ddot{Y}_g + k_{y0}(Y_n - Y_g)),$$

где  $\dot{X}_g^T, \dot{Y}_g^T, u^T$  – требуемые скорости изменения прямоугольных координат, продольной составляющей скорости движения судна;  $\ddot{X}_g, \ddot{Y}_g, \ddot{X}_n, \ddot{Y}_n$  – ускорения измеренных и программных прямоугольных координат;  $\varphi$  – направление вектора скорости перемещения, относительно грунта.

По требуемым скоростям движения (6) формируется закон изменения угла поворота судна на запланированный маршрут (1), (2) с обратными связями, через отклонения координат (5):

$$(7) \quad \psi^T = \arctan((u\dot{Y}_g^T - \dot{X}_g^T v)/(u\dot{X}_g^T + v\dot{Y}_g^T)),$$

где  $\psi^T$  – управляющая функция (требуемый угол поворота судна).

Угол поворота (7), как псевдоуправление, отслеживается системой управления курсом (СУК) на нижнем уровне иерархии с внутренним контуром угловой скорости, вырабатывающим управляющие моменты, соответствующие перекладке руля:

$$(8) \quad M(\delta) = k k_0 \int_0^t (r^T - r) dt + k(r_0 - r); \quad r^T = k_{c0} \int_0^t ((\psi^T - \psi) - k_{c1} r) dt,$$

где  $M(\delta)$  – управляющий момент от перекладки руля;  $r^T, r, r_0$  – требуемая, текущая угловые скорости поворота, начальные условия интегрирования;  $k_{ci}$  – коэффициенты желаемых переходных процессов по курсу;  $k, k_0$  – коэффициенты усиления и желаемых переходных процессов по угловой скорости поворота.

Аналогично строится система отслеживания требуемой скорости (6) движения судна, а управляющая сила, определяемая частотой вращения винта, представляет алгоритм системы управления скоростью:

$$(9) \quad P(n) = k_v k_{ov} \int_0^t (u^T - u) dt + k_v (u_0 - u),$$

где  $u_0$  – начальные условия интегрирования;  $k_{ov}$  – коэффициент желаемой динамики переходных процессов.

Желаемые переходные процессы по курсу задаются уравнениями второго порядка, линейной и угловой скоростей - первого из-за большой инерционности судна [2].

Другой способ отслеживания маршрута, режимов движения судна предлагается на основе иерархического принципа, с использованием классических ПИД (пропорционально-интегрального-дифференциального) регуляторов [6], устанавливающих условия требуемого угла поворота, и управляющего воздействия, в виде угла перекладки руля:

$$(10) \quad k_1 \Delta_{xy} + k_2 \int \Delta_{xy} dt + k_3 \dot{\Delta}_{xy} \rightarrow 0; \quad \psi^T = f(\Delta_{xy}, \int \Delta_{xy}, \dot{\Delta}_{xy});$$

$$k_{\psi 1} (\psi - \psi^T) + k_{\psi 2} \int (\psi - \psi^T) dt + k_{\psi 3} (r - r^T) \rightarrow 0;$$

$$\delta^T = f((\psi - \psi^T), \int (\psi - \psi^T) dt, (r - r^T)),$$

где  $k_i$ ,  $k_{\psi i}$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления системы траекторного управления (СТУ) и СУК, соответственно;  $\Delta_{xy}$ ,  $\dot{\Delta}_{xy}$  – боковое отклонение от запланированного маршрута, скорость его изменения.

Тогда, на основе принципа задания маршрута и движений с помощью СТФ (2) и условий (10) для управлений, после преобразований, получается задающая функция требуемого угла поворота и его отслеживание в виде требуемого угла перекладки руля:

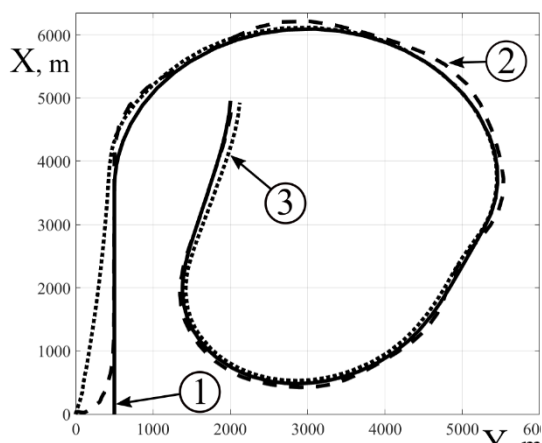
$$(11) \quad \psi^T = \psi_{\Pi} + \frac{k_1 \Delta_{xy} + k_2 \int \Delta_{xy} dt + k_3 \dot{\Delta}_{xy}}{1 + \exp(4g_{\Delta xy} / (k_1 \Delta_{xy} + k_2 \int \Delta_{xy} dt + k_3 \dot{\Delta}_{xy}))};$$

$$(12) \quad \delta^T = -\frac{r^{\delta_{\max}}}{2k_{\Pi}} \ln \left( 2 \left( \frac{k_{\psi 1} (\psi - \psi^T) + k_{\psi 2} \int (\psi - \psi^T) dt + k_{\psi 3} (r - r^T)}{r^{\delta_{\max}}} + 1 \right)^{-1} - 1 \right),$$

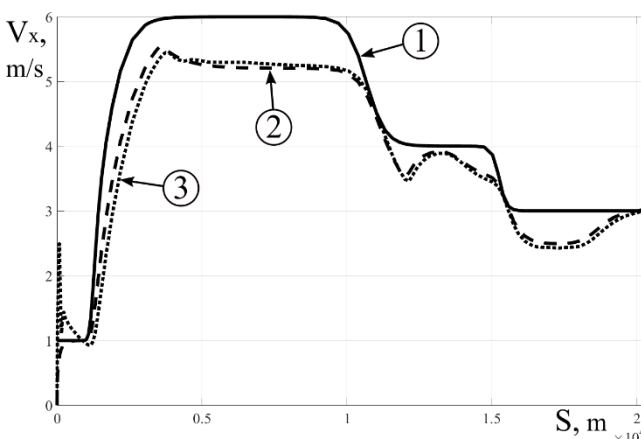
где  $g_{\Delta xy}$  – максимальная скорость изменения координат по траектории выхода на запланированный маршрут.

## 5. Результаты математического моделирования

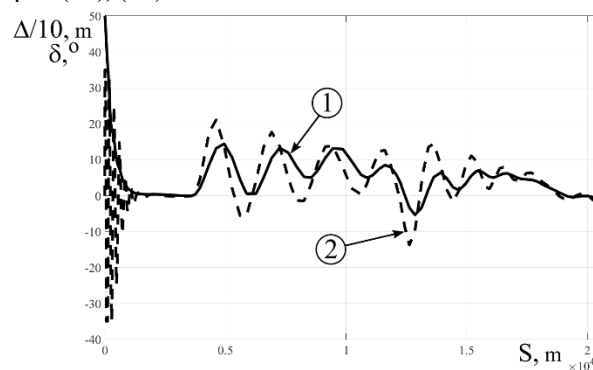
Предлагаемый подход задания маршрута и способов его отслеживания проверен моделированием процессов в MATLAB для модели судна водоизмещением 150 тыс. тонн, рис. 1 – 4.



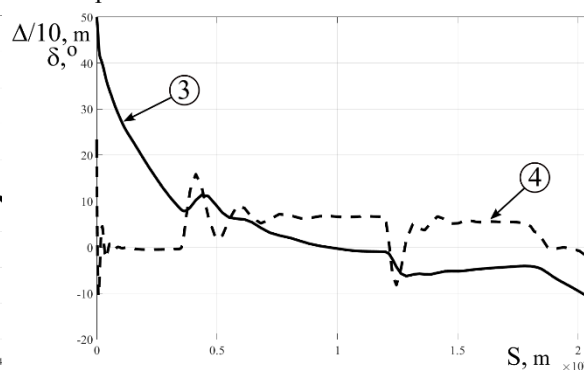
**Рис. 1.** Заданный маршрут и фактические траектории движения:  
1 – запланированный маршрут (1), (2); 2 – фактическая траектория (7), (8); 3 – фактическая траектория (11), (12).



**Рис. 2.** Программные и фактические значения скорости движения по (9):  
1 – программная скорость по выражению (2); 2 – программная скорость с учетом (4), 3 – фактическая скорость.



**Рис. 3.** Боковое отклонение и углы перекладки руля при отслеживании маршрута по выражениям (7), (8):  
1 – боковое отклонение; 2 – углы перекладки руля.



**Рис. 4.** Боковое отклонение и углы перекладки руля при отслеживании маршрута по выражениям (11), (12):  
3 – боковое отклонение; 4 – углы перекладки руля.

## 6. Результаты натурного эксперимента

Для проведения натуральных исследований автоматизации задач судовождения сконструирована модель судна, оснащенная системой управления, с разделением решаемых задач. Судовой модуль управления включает подмодуль обработки, записи и передачи данных от измерительных устройств и подмодуль приема и обработки информации движительно-рулевым комплексом; внешний модуль управления включает подмодуль передачи информации и подмодуль приема и обработки информации. Проведенные ходовые испытания, проверка автоматического отслеживания курса, вектора движения, траектории показали - сконструированная модель пригодна для дальнейших исследований и решения задач автоматизации и интеллектуализации судовождения.

## 7. Заключение

Аппроксимирующая СТФ (1), (2) определяет непрерывное, гладкое изменение кинематических параметров программных движений судна по маршруту, учитывается изменение кинематических параметров от действия органов управления (3), (4). Метод может использоваться для построения маршрута с гарантированной полосой проводки и режимов движения. Варианты иерархических уровней систем управления, синтезированные методом обратных задач динамики способны отслеживать любые допустимые маршруты и режимы движения судна.

Предлагаемые методы и алгоритмы могут найти применение в современных навигационных комплексах, интеллектуальных системах, при разработке схем маневрирования в стесненных водах, обучающих тренажерных комплексах судоводителей, повысят качество, безопасность и эффективность выполнения маневров судов.

## Список литературы

1. Васильев С.Н., Галяев А.А. Логико-оптимизационный подход в задачах преследования группы целей // Доклады Академии наук. 2017. Т. 474, № 6. С. 675-681.
2. Васьков, А.С. Методы управления движением судна и конфигурацией зоны навигационной безопасности. Новороссийск: НГМА, 1997. 248 с.
3. Дмитриев С.П., Пелевин А.Е. Задачи навигации и управления при стабилизации судна на траектории. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2004. 160 с.
4. Довгоброд Г.М., Клячко Л.М. Упрощенное построение закона управления, обеспечивающего движение объекта по заданной криволинейной траектории // Гироскопия и навигация. 2011. № 3. С. 24-33.
5. Корнев Г.В. Цель и приспособляемость движения. М.: Наука, 1974. 528 с.
6. Методы классической и современной теории автоматического управления: Т.3. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. Егупова. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 748 с.
7. Мироненко А.А. Методология формализации навигационной обстановки и программирования движений судна. Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф.Ф. Ушакова, 2016. 162 с.
8. Пшихопов В.Х. Аналитический синтез позиционно-траекторных систем управления подвижными объектами: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.13.01. Таганрог, 2009. 32 с.
9. Теряев Е.Д., Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б., Петрин К.В. Концепция «гибких кинематических траекторий» в задачах терминального управления подвижными объектами // Мехатроника, автоматизация, управления. 2011. № 12. С. 7-15.
10. Being a Responsible Industry: An Industry Code of Practice. Maritime Autonomous Surface Ships up to and including 24 metres in length. Published by the Society of Maritime Industries on behalf of Maritime, UK. 2017. 84 p.

11. Global Marine Technology Trends 2030. Lloyd's Register, QinetiQ and University of Southampton, UK, 2015. 188 p. <http://www.ukmarinealliance.co.uk>
12. LaValle St. Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 1007 p.