

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415

PLANNING AND CONTROL OF THE SHIP CURVILINEAR ROUTE

A. S. Vas'kov¹, A. A. Mironenko²

¹ — Admiral Ushakov State Maritime University, Novorossiysk, Russian Federation

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

The possibility of applying the traditional navigation parameters used in pilotage (bearing and distance), as well as their sum and difference for planning and controlling the ship curvilinear route in coastal waters is being investigated. Mathematical apparatus is based on the classical navigation methods such as the theory of isolines, the lines of position, the principles of route planning, as well as the approximation of the curvilinear route. The mathematical justification of the circle arcs, ellipse and hyperbola used as the approximation lines of both the ship curvilinear route and the control isolines is given. The methods for estimating the vessel approaching to the point of the beginning and end of the turn and for controlling the ship movement along the planned path by measuring the navigational parameters are proposed. The problems of the physical and mathematical feasibility of the route arising at the junction points of the straight and curvilinear parts of the ship route are recommended to be resolved on the principles of transition curves (clothoids), considering the maneuvering characteristics of the vessel. The main theses of the research are supported by the graphical interpretation while the given expressions are ready for practical application. The formalization of the proposed methods in both automatic navigation systems and autonomous ship control systems will allow the navigator on the bases of the configuration of the relative position of landmarks and the ship curvilinear route to solve the problems of processing relevant navigation information in coastal and congested waters more efficiently in conjunction with the traditional pilotage methods, which is especially important for advanced autonomous navigation.

Keywords: curvilinear route, navigation parameter, bearing, distance, isostage, isogon, ellipse, hyperbola, transition curve, “blind pilot” navigation methods.

For citation:

Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. “Planning and control of the ship curvilinear route.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 15.3 (2023): 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

УДК 656.61.052.4

ПЛАНИРОВАНИЕ И КОНТРОЛЬ КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ СУДНА

А. С. Васьков¹, А. А. Мироненко²

¹ — ФГБОУ ВО «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 работе исследована возможность использования основных навигационных параметров, традиционно применяемых в лоцманской проводке (пеленг и дистанция), а также их суммы и разности для планирования и контроля движения судна по криволинейным участкам пути в условиях прибрежного плавания. В качестве математического аппарата задействованы классические методы навигации (теория изолиний, линий положения, принципы задания маршрута, включая аппроксимацию криволинейных участков пути). Дано математическое обоснование дуг окружности, эллипса и гиперболы в качестве ведущих для криволинейных участков траекторий заданного пути и одновременно контрольных изолиний. Предложены методы оценки выхода судна в точку начала и конца поворота, а также контроля движения судна по запланированному пути по измерениям навигационных параметров. Проблемы физической и математической реализуемости маршрута, возникающие в точках сопряжения прямолинейных и криволинейных участков, рекомендовано разрешать на основе использования принципов переходных кривых (клотоиды) с учетом маневренных

особенностей судна. Основные положения исследования подкреплены графической интерпретацией, а приведенные выражения доведены до уровня их непосредственного практического применения. Формализация предлагаемых методов в автоматических навигационных комплексах или системах управления автономными судами позволит судоводителю на борту и управляющему судном дистанционно решать задачи обработки соответствующей навигационной информации в прибрежных и стесненных районах плавания на качественно новом уровне в неразрывной связи с традиционными лоцманскими методами контроля.

Ключевые слова: криволинейная траектория, навигационный параметр, пеленг, дистанция, изостадия, изогона, эллипс, гипербола, переходная кривая, методы ускоренного контроля.

Для цитирования:

Васьков А. С. Планирование и контроль криволинейной траектории движения судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 401–415. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-401-415.

Введение (Introduction)

Для обеспечения безопасности мореплавания, в соответствии с действующими нормативами ИМО (SOLAS-74, STCW-78, А.893(21)), должны осуществляться заблаговременное планирование маршрута и текущий контроль движения судна, что подтверждено многочисленными исследованиями [1]–[20]. Распространенными причинами посадок на мель и касаний грунта являются неудовлетворительный контроль местоположения судна, навигационные ошибки и неверная интерпретация измеренных параметров [21]–[24].

В прибрежном плавании и стесненных водах наиболее распространенным, простым и удобным способом контроля движения судна относительно запланированного маршрута — линии запланированного пути (ЛЗП), является регулярное измерение навигационных параметров (НП). Традиционными НП, измеряемыми для этих целей особенно при лоцманской проводке, являются пеленги или дистанции до навигационных неподвижных ориентиров или их комбинация (например, технология параллельной индексации (ПИ) [4], [5], [12], [14], [17]–[20], [25]). Значения этих НП, их изолинии и параллельный индекс используются в качестве ведущих линий положения (ВЛП) по ЛЗП, а также ограждающих линий положения (ОЛП) относительно опасностей и контроля поворота (контрольных линий положения (КЛП)) [4], [5], [11], [17], [19], [20], [25]. Теоретические основы, рекомендации по использованию и оценке полосы, занимаемой судном при движении на прямолинейных участках маршрута, применение НП-пеленга и дистанции как в зарубежных [16–20], [25], так и отечественных [4], [5], [7], [11], [12], [14] источниках хорошо проработаны. Оценки погрешностей параллельного индексирования и алгоритм выбора наилучшего НП в качестве ВЛП, ОЛП или КЛП, рассмотрены в работе авторов [5].

Проблемным остается вопрос контроля движения судна по криволинейной траектории. Судоводителю недостаточно знания точных значений координат местоположения судна (бокового смещения относительно ЛЗП), текущего курса судна, направления и величины вектора скорости относительно грунта, следует оценивать угловую скорость поворота судна во взаимосвязи со скоростью движения судна относительно грунта по запланированному радиусу кривизны траектории. Некорректным является применение дуги окружности постоянного радиуса в качестве аппроксимации криволинейного участка ЛЗП из-за невозможности физической реализации процесса поворота реального судна по ней [11].

Планирование маршрута и режима движения подвижных объектов (судна) является предметом множества исследований и остается актуальным [1]–[3], [7], [10], [11], [13], [15], [19], поскольку представляет основу автономной и интеллектуальной навигации. Анализ маршрута и режима движения судна показывает общность решений — декомпозицию этой фундаментальной проблемы на следующие взаимосвязанные подзадачи:

1. Формализация района и условий плавания, навигационной обстановки.

2. Планирование физически реализуемого маршрута заданной гладкости программных режимов движения из начального положения в целевое с учетом маневренных качеств и особенностей объекта, без перегрузок исполнительных механизмов.

3. Генерирование, отслеживание программных движений в систему управления по принципу «невозмущенного-возмущенного движения» Ляпунова – Летова для малых отклонений или коррекция программных движений при значительных отклонениях.

Целью исследования является исключение недостатков применения различных кривых (окружностей, эллипсов, клотоид, полиномов, сплайн-функций, сигмоидальных и т. п.) в автоматизированных навигационных комплексах [1], [2], [6], [7], [10], [13], [15], [16], [19], [22], [25]:

- «а-физичность» задания криволинейных участков маршрута, т. е. невозможность выполнения поворота физическим объектом, в частности судном, по некоторым видам кривых;
- уход от традиционных способов контроля процесса поворота судна ускоренными навигационными методами с «привязкой» к ориентирам измеряемыми НП;
- слабая взаимосвязь традиционных способов задания и контроля маршрута с применяемыми методами в ECDIS и системах автоматического управления по траектории;
- невозможность обеспечения точной проводки судна при автоматическом или интеллектуальном управлении по ЛЗП;
- использование неединообразных выражений для задания всей ЛЗП и полосы проводки.

К проблемам планирования криволинейных траектории движения судна можно отнести вопросы математического описания поворота, включая «привязку» элементов аппроксимирующей кривой к особенностям узкости (радиусу кривизны и его изменению), маневренным качествам судна, традиционным методам контроля движения в судовождении по НП.

Таким образом, ранее изложенное указывает на необходимость разработки новых моделей криволинейных участков маршрута судна средствами современных ECDIS во взаимосвязи так же, как с традиционными (лоцманскими / ускоренными) методами планирования и управления по ЛЗП, в том числе, в автоматическом режиме.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Под построением программных движений [11] понимается формализация процесса перемещения одной точки судна по заданной траектории с заданным скоростным режимом. Положение и движение судна относительно грунта определяются прямоугольными координатами его ЦТ (Og, Xg, Yg), вектором скорости и его компонентами: истинным курсом, углом дрейфа, линейной и угловой скоростью (рис. 1).

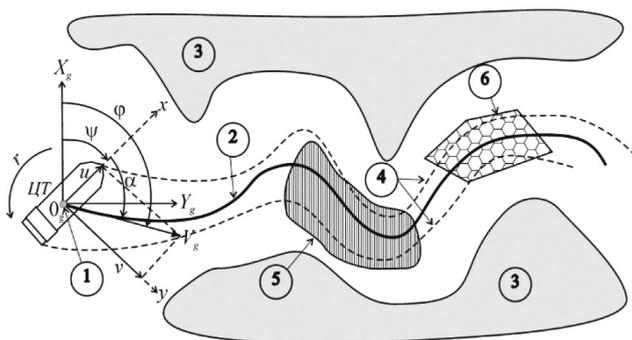


Рис. 1. Элементы планирования движения судна в стесненных водах:

- ψ — угол курса судна; V_g, φ — вектор скорости перемещения ЦТ судна относительно грунта и его направление; u, v — продольная и поперечная составляющие скорости; α — угол дрейфа в ЦТ судна; r — угловая скорость;
- 1 — начальное положение; 2 — оптимальная траектория; 3 — навигационные опасности; 4 — безопасная полоса проводки; 5 — особые условия; 6 — правые ограничения

Кинематические параметры взаимосвязаны между собой, что позволяет использовать их для решения различных задач движения судна, и представляются при малости скоростей изменения дрейфа следующими соотношениями [11]:

$$V_g = \sqrt{u^2 + v^2}; u = V_g \cos \alpha; v = V_g \sin \alpha; \tan \alpha = \frac{v}{u}; \frac{d\alpha}{dt} = 0;$$

$$r = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{V_g}{R}; R = \frac{V_g}{r}, \quad (1)$$

где R — радиус кривизны криволинейного участка пути судна, м.

В диаметральной плоскости (ДП) судна существует точка (центр вращения или полюс поворота), в которой направление мгновенного вектора скорости относительно грунта совпадает с направлением ДП, т. е. угол дрейфа равен нулю [11] — рис. 2, а ее абсцисса находится из выражения

$$X_{\text{ПП}} = \frac{u}{r} \tan \alpha = R \sin \alpha, \quad (2)$$

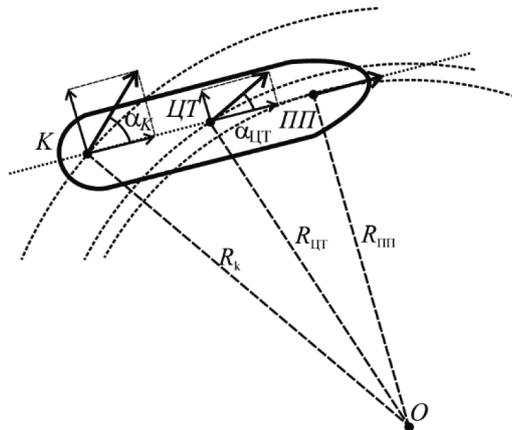


Рис. 2. Изменение характеристик криволинейного движения по длине судна

откуда следует, что угол дрейфа достигает наибольшего значения на срезе кормы, уменьшается в направлении носовой части судна, в полюсе поворота равен нулю, а далее меняет знак на противоположный. Линейные скорости любой точки судна относительно выбранного полюса при криволинейном движении определяются по формуле Ривальса [11]:

$$u_i = u + rY; v_i = v - rX. \quad (3)$$

В общем случае любая произвольная точка судна движется по криволинейной траектории со своим радиусом кривизны, угол дрейфа в которой определяется из выражений (1) и (3):

$$\tan \alpha_i = \frac{v_i}{u_i} = \frac{v - rX}{u + rY}. \quad (4)$$

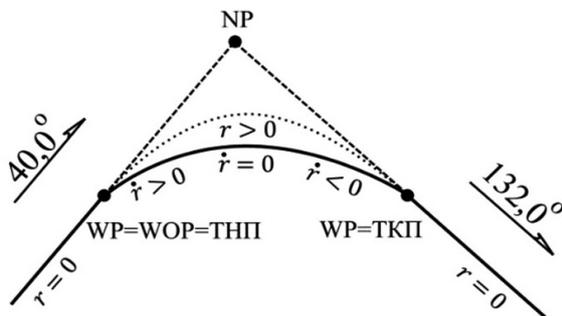


Рис. 3. Процесс поворота судна:
NP Node Point (узловая точка) — точка пересечения продолжений прямолнейных участков ЛЗП;
WP — путевые точки; ТНП = WOP, ТКП — соответственно точки начала и конца поворота

Судовождение на криволинейных участках маршрута относится к одному из наиболее ответственных моментов плавания [12], [14], [19], [20], [22]. В практическом судовождении процесс поворота разбивается на три периода [2], [11], [12], [14]: увеличение угловой скорости до заданной, поддержание ее запланированного значения и уменьшение до нуля при выходе на требуемый курс (рис. 3).

Расчеты выполняются исходя из опыта конкретного судоводителя и корректируются в зависимости от реальных условий в ходе маневра.

Результаты и обсуждение (Results and Discussion)

В целях совершенствования процессов планирования криволинейных участков ЛЗП судна и последующего контроля его движения в системах управления предлагается рассмотреть кривые второго порядка, включая их особенности, во взаимосвязи с традиционными НП и их комбинациями, измеряемыми навигационными средствами, в том числе автоматически.

Аппроксимация криволинейного участка траектории дугой окружности. В современных ECDIS, по исследованиям [1], [3], [4], [6], [10], [11], [24], криволинейные участки траектории судна в подавляющем большинстве случаев задаются дугой окружности. При этом контроль движения судна по этому участку ЛЗП целесообразно осуществлять НП — заданной дистанцией до ориентира, которой соответствует ВЛП — дуга малого круга (изостадия), также применяемая в качестве КЛП. Ее уравнение в прямоугольной системе координат с центром в ориентире рис. 4 (точка $O(A)$) и со смещенным центром имеет следующий вид и параметры [5]:

$$x^2 + y^2 = R^2 = D_3; (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 = D_3; \tau_D = \Pi 180; g_D = 1, \quad (5)$$

где x_0, y_0 — прямоугольные координаты смещенного центра окружности;

x, y, Π — прямоугольные координаты, пеленг на ориентир;

D_3, τ_D, g_D — ведущий и контрольный НП — заданная дистанция, направление и модуль градиента.

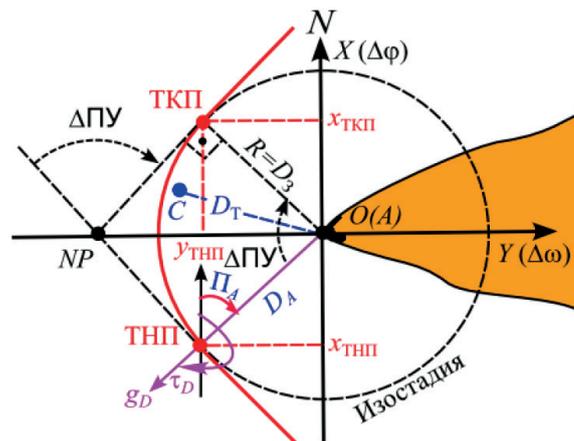


Рис. 4. Криволинейные участки траектории в виде дуги окружности:

$R = D_3 = \text{const}$ — НП для ВЛП и КЛП;

$x_{\text{ТНП}}, y_{\text{ТНП}}, x_{\text{ТКП}}, y_{\text{ТКП}}$ — прямоугольные координаты ТНП, ТКП;

$\Pi_A, D_A(D_3)$ — полярные координаты (контрольный пеленг и дистанция ТНП)

Координаты точек NP , ТНП, ТКП определяются радиусом дуги окружности R и углом поворота (изменением направления пути $\Delta\PY$) из рис. 4:

$$\begin{aligned} x_{NP} &= 0; y_{NP} = R / \cos \frac{\Delta\PY}{2}; x_{\text{ТНП}} = -R \sin \frac{\Delta\PY}{2}; y_{\text{ТНП}} = R \cos \frac{\Delta\PY}{2}; \\ x_{\text{ТКП}} &= R \sin \frac{\Delta\PY}{2}; y_{\text{ТКП}} = R \cos \frac{\Delta\PY}{2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Боковое отклонение текущей позиции судна (XTE) относительно криволинейной ЛЗП — дуги окружности — оценивается в виде

$$XTE = D_T - D_3 = D_T - R. \quad (7)$$

В практическом судовождении процесс контроля происходит следующим образом. На индикаторе кругового обзора (ИКО) радиолокационной станции (РЛС) выставляется подвижный круг дальности (ПКД) радиусом $R = D_3$ (рис. 5). Момент прихода судна в ТНП контролируется по касанию

выставленным ПКД ориентира A и пеленгу Π_A . Руль переключается на угол, обеспечивающий, по данным маневренных характеристик судна и условиям плавания, выход на запланированное значение радиуса поворота R .

Контроль процесса поворота осуществляется отслеживанием на ИКО РЛС перемещения отметки ориентира A по ПКД, т. е. регулярным сравнением текущей измеренной дистанции до ориентира с запланированной ($R = D_3$). Отклонения позиции судна от запланированной траектории (отметка ориентира A справа ($D_T > D_3$), слева ($D_T < D_3$) от ПКД) компенсируются соответствующими (влево / вправо) переключками руля для коррекции курса судна. Например, на рис. 4 для точки C ($D_T < D_3$) требуется (как минимум) уменьшение величины переключки руля.

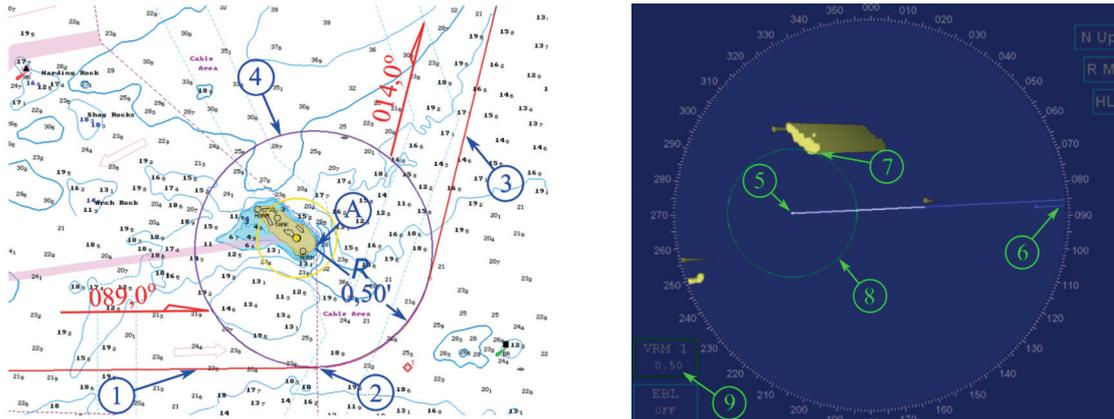


Рис. 5. Контроль процесса поворота

- по ВЛП — изостадии ($R = D_3 = \text{const}$) (ПКД): A — приметный ориентир;
 1 — прямолинейный отрезок ЛЗП ($089,0^\circ$); 2 — ТНП; 3 — прямолинейный отрезок ЛЗП ($014,0^\circ$);
 4 — ВЛП $R = D_3 = 0,50$ мили контроля поворота; 5 — текущая позиция судна на ИКО;
 6 — отметка курса; 7 — отметка ориентира для контроля поворота (судно в ТНП);
 8 — ПКД = ВЛП контроля поворота; 9 — значение ПКД = ВЛП = 0,50 мили

Дуга малого круга является также изолинией горизонтального угла, измеренного непосредственно или как разность пеленгов двух ориентиров — изогона рис. 6 [26]:

$$\gamma = \Pi_A - \Pi_B; \gamma = \Pi_A + \delta; \text{ctg } \delta = \frac{D_A \sin \gamma}{D_B - D_A \cos \gamma}; g_\gamma = 57,3 \frac{d}{D_A D_B}; R = \frac{d}{2 \sin \gamma}, \quad (8)$$

где γ, d — горизонтальный угол, базовое расстояние (расстояние между ориентирами);
 Π_A, Π_B, δ — пеленги на ориентиры (A, B) и вспомогательный угол;
 τ_γ, g_γ — направление и модуль градиента горизонтального угла (разность пеленгов);
 D_A, D_B — дистанции до ориентиров A, B .

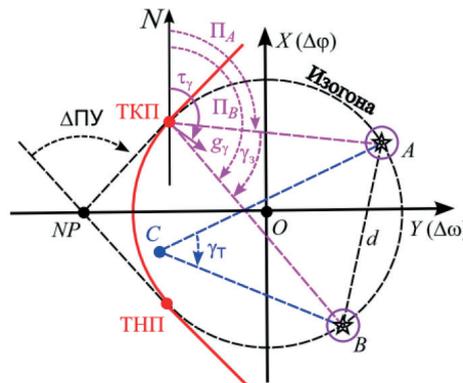


Рис. 6. Криволинейный участок траектории в виде дуги окружности:
 $\gamma_3 = \text{const}$ — заданный горизонтальный угол — НП для ВЛП;
 Π_A, Π_B — пеленги на ориентиры A и B для контроля выхода судна в ТНП и ТКП

Если через расположения ориентиров (A, B) проходит дуга окружности криволинейной ЛЗП, то контроль ТНП, ТКП и процесса поворота осуществляется по разности измеренных пеленгов (Π_A, Π_B) на ориентиры (A, B), определяющие горизонтальный угол в навигационной системе [5]. Боковое смещение судна от криволинейной ЛЗП, с учетом формул (8), определяет требуемые перекладки руля (влево / вправо):

$$\gamma_B = \Pi_A - \Pi_B = \gamma_3; \quad \Pi_A = \Pi_{A(\text{ТНП})}; \quad \Pi_B = \Pi_{B(\text{ТНП})}; \quad \Pi_A = \Pi_{A(\text{ТКП})}; \quad \Pi_B = \Pi_{B(\text{ТКП})};$$

$$XTE = R - R_3 = \frac{d}{2} \left(\frac{1}{\sin \gamma_T} - \frac{1}{\sin \gamma_3} \right) \text{ или } XTE = \frac{D_A D_B (\gamma_T - \gamma_3)}{57,3 d}. \quad (9)$$

Расположение навигационного ориентира в центре дуги окружности, аппроксимирующей поворот, и тем более двух ориентиров являются частными случаями судовождения (см. рис. 4–6). В общем случае контроль процесса поворота должен осуществляться с помощью дополнительных контрольных параметров (например, скорости судна относительно грунта (по показаниям доплеровского лага или ГЛОНАСС/GPS) и угловой скорости поворота с запланированным радиусом поворота (1) [28]). В частности, запланированный поворот по дуге с радиусом $R_3 = 0,5$ мили от ТНП до ТКП рис. 7 при скорости судна относительно грунта $V_g \cong 6$ уз должен выполняться с угловой скоростью $r \cong 12^\circ/\text{мин}$ из выражения (1). Если текущее значение угловой скорости поворота составляет $7^\circ/\text{мин}$ при скорости 6 уз (см. рис. 7, точка 5), то из выражения (1) $R_T \cong 0,9$ мили, что больше, чем $R_3 = 0,5$ мили. Поэтому необходимо увеличить угол перекладки руля или частоту вращения движителя.

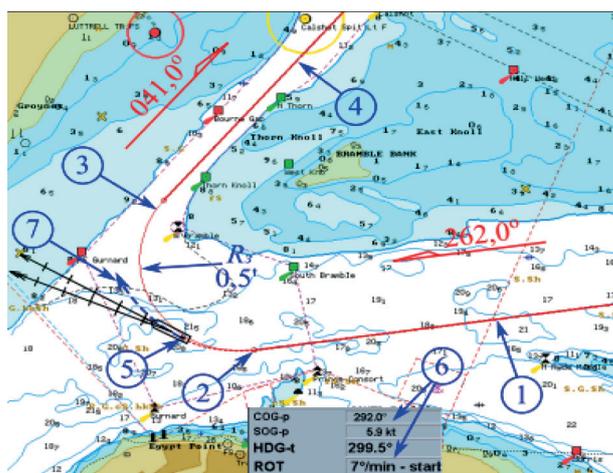


Рис. 7. ВЛП контроля процесса поворота — угловая скорость (ROT) ECDIS:

- 1 — прямолинейный отрезок ЛЗП ($262,0^\circ$); 2 — ТНП; 3 — дуга окружности радиусом $R_3 = 0,5$ мили;
- 4 — прямолинейный отрезок ЛЗП ($041,0^\circ$); 5 — текущая позиция судна;
- 6 — контролируемые параметры движения судна; 7 — тенденция движения судна при текущих параметрах (6) с окончанием поворота слева от ЛЗП (4)

Аппроксимация криволинейного участка траектории дугой эллипса. Анализ исследования [2] показывает, что криволинейный участок маршрута можно аппроксимировать дугой эллипса. Тогда контроль движения судна по этому участку ЛЗП в системе управления целесообразно осуществлять НП — суммой дистанций до ориентиров (A, B), которые являются фокусами эллипса, соответствующего ВЛП. Его уравнение в прямоугольной системе координат, связанной с центром базы между ориентирами (A, B) рис. 8 или со смещенным центром, имеет вид и соответствующие параметры [27]:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad \frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1; \quad (10)$$

$$D_A + D_B = 2a; \quad D_A = \sqrt{(x+d/2)^2 + y^2} = a + ex; \quad D_B = \sqrt{(x-d/2)^2 + y^2} = a - ex;$$

$$b = \sqrt{a^2 - \frac{d^2}{4}} = 0,5\sqrt{(D_A + D_B)^2 - d^2}; \quad a > 0,5d > b; \quad e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}} = 0,5\frac{d}{a} = \frac{d}{D_A + D_B}; \quad (11)$$

$$\Sigma_D = \Pi_{cp} \pm 180^\circ = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 180^\circ; \quad g_{\Sigma D} = \left| 2 \cos \frac{w}{2} \right|; \quad w = \Pi_B - \Pi_A,$$

где a, b, e — соответственно большая, малая полуоси и эксцентриситет эллипса;
 Π_{cp}, w — средний пеленг и базовый угол;
 $\tau_{\Sigma D}, g_{\Sigma D}$ — направление и модуль градиента эллипса.

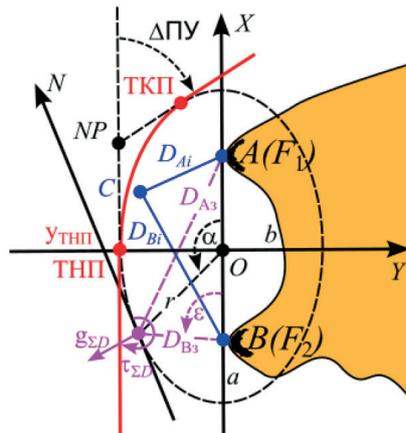


Рис. 8. Криволинейный участок траектории в виде дуги эллипса:
 $(D_A + D_B)_3 = \text{const}$ — НП для ВЛП; $(D_{Ai} + D_{Bi}) \neq (D_A + D_B)_3$ — смещение с траектории

По радиусам-векторам дистанций D_A и D_B от ориентиров из выражений (11), уравнению (10) и базовому расстоянию в системе управления определяются координаты точек дуги эллипса для построения криволинейного участка маршрута:

$$x = \frac{D_A - a}{e} = \frac{D_A^2 - D_B^2}{2d}; \quad y = \sqrt{D_B^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 - d^2}{2d} \right)^2} = \sqrt{D_A^2 - \left(\frac{D_A^2 - D_B^2 + d^2}{2d} \right)^2}. \quad (12)$$

Уравнение эллипса в полярных координатах с началом в фокусе — ориентире A с учетом преобразований по выражениям (11) дает радиусы-векторы, связанные с измеряемыми дистанциями D_A, D_B до ориентиров, базовым расстоянием d и перичентральным углом, который может использоваться для контроля выхода в ТНП или ТКП и движения по дуге эллипса:

$$\rho_i = D_i = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \varepsilon_i} = \frac{0,5(D_A + D_B)((D_A + D_B) - d^2)}{D_A + D_B + d \cos \varepsilon_i}, \quad (13)$$

где ρ_i — радиус-вектор от фокуса ориентира A до точек дуги эллипса;

ε — перичентральный угол от направления базы — оси OX до направления из фокуса — ориентира на текущую точку дуги эллипса.

Боковое смещение судна (XTE) с ЛЗП по дуге эллипса контролируется системой управления сравнением текущей суммы дистанций с заданной контрольной $(D_A + D_B)_3 = \text{const}$ или определяется как смещение линии положения из выражений (11) (см. рис. 8) и корректируется соответствующими переключками руля (влево / вправо):

$$XTE = \frac{(D_A + D_B) - (D_A + D_B)_3}{2 \cos \frac{w}{2}}. \quad (14)$$

Аппроксимация криволинейного участка маршрута дугой гиперболы. Контроль движения судна по криволинейному участку ЛЗП, аппроксимированному дугой гиперболы в системе управления целесообразно осуществлять НП — разностью дистанций до ориентиров (A, B), которые являются фокусами гиперболы, соответствующей ВЛП. Ее уравнение в прямоугольной системе координат, связанной с центром базы между ориентирами (A, B) рис. 9 или со смещенным центром, имеет вид и соответствующие параметры [26], [27]:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1; \quad \frac{(x-x_0)^2}{a^2} - \frac{(y-y_0)^2}{b^2} = 1; \quad (15)$$

$$\Delta D = 2a = D_B - D_A = \text{const}; \quad b = \sqrt{\frac{d^2}{4} - a^2} = \frac{\sqrt{d^2 - (D_B - D_A)^2}}{2}; \quad e = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{a^2}} = 0,5 \frac{d}{a} = \frac{d}{D_B - D_A};$$

$$\Delta_D = \Pi_{\text{ср}} \pm 90^\circ = \frac{\Pi_A + \Pi_B}{2} \pm 90^\circ; \quad g_{\Delta D} = \left| 2 \sin \frac{w}{2} \right|; \quad w = \Pi_B - \Pi_A, \quad (16)$$

где $\tau_{\Delta D}, g_{\Delta D}$ — соответственно направление и модуль градиента гиперболы.

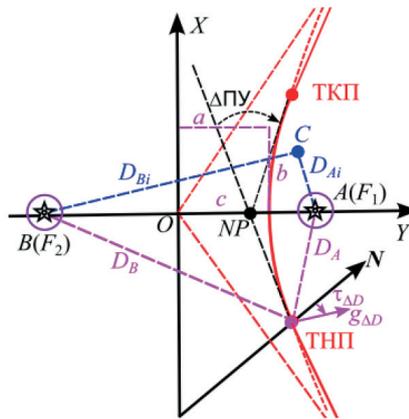


Рис. 9. Криволинейный участок траектории в виде дуги гиперболы:
 $D_B - D_A = \text{const}$ — НП для ВЛП; $(D_{Ai} - D_{Bi}) \neq (D_A - D_B)_3$ — смещение с траектории

По радиусам-векторам дистанций D_A и D_B от ориентиров, уравнению (15) и базовому расстоянию в системе управления определяются координаты точек дуги гиперболы для построения криволинейного участка маршрута:

$$D = ex - a; \quad D = a + ex;$$

$$x = \frac{(D_A + a)}{e} = \frac{\Delta D(2D_A + \Delta D)}{2d}; \quad y = \sqrt{\frac{4b^2(D_A + a)^2}{d^2} - b^2} = \sqrt{\frac{b^2(2D_A + \Delta D)^2}{d^2} - b^2}. \quad (17)$$

Касательная (прямолинейных участков маршрута) к дуге гиперболы в ТНП, ТКП соответствует в судовождении линии положения, уравнение и коэффициент наклона касательной к базе между ориентирами (оси OX) определяются выражениями:

$$k = \frac{b^2 x_T}{a^2 y_T} = \left(\frac{d^2}{(D_B - D_A)^2} - 1 \right) \frac{x_T}{y_T}; \quad y = y_T + \left(\frac{d^2}{(D_B - D_A)^2} - 1 \right) (x - x_T) \frac{x_T}{y_T}, \quad (18)$$

где k — коэффициент наклона касательной к оси OX ;

x_T, y_T — координаты точки касательной к гиперболы (ТНП или ТКП).

Уравнение гиперболы в полярных координатах с началом в фокусе — ориентире A , подобно эллипсу, после преобразований дает радиусы-векторы, связанные с измеряемыми дистанциями

до навигационных ориентиров D_A, D_B , базовым расстоянием d и перицентральным углом, который может использоваться для контроля выхода в ТНП или ТКП и движения по гиперболе:

$$\rho_i = D_i = \frac{a(e^2 - 1)}{1 + e \cos \epsilon} = \frac{d^2 - (D_B - D_A)^2}{2(D_B - D_A + d \cos \epsilon_i)}. \quad (19)$$

Боковое смещение судна (XTE) с ЛЗП на криволинейном участке — дуге гиперболы, контролируется системой управления сравнением текущей и заданной $(D_B - D_A)_3 = \text{const}$ разности дистанций или определяется как смещение линии положения из выражений (16) (см. рис. 9) и корректируется соответствующими перекладками руля (влево / вправо):

$$XTE = \frac{(D_B - D_A) - (D_B - D_A)_3}{2 \sin \frac{w}{2}}. \quad (20)$$

Контроль выхода судна в ТНП, ТКП при движении на криволинейном участке, представленном эллипсом или гиперболой, лучше осуществлять по пеленгам ориентиров ($\Pi_{\text{ТНП}}, \Pi_{\text{ТКП}}$) [5].

Аппроксимация криволинейной траектории клотоидой. В точках сопряжения прямолинейных и криволинейных участков траектории, заданными дугами эллипса, гиперболы или окружности возникает ситуация разрывов первого и второго рода (см. рис. 4–7), т. е. одновременно на криволинейных и прямолинейных участках пути значения угловых скоростей (1) и ускорений не совпадают. Следовательно, в точках сопряжения заданная траектория физически и математически нереализуема подвижным объектом, в частности судном. Для устранения этого недостатка при построении непрерывной траекторий подвижных объектов применяют кривые с изменяющейся кривизной по линейному закону (например, клотоиды рис. 10 [11]):

$$R_k = \frac{K^2}{S} = \frac{R l_k}{S}; \quad K = \sqrt{R l_k}, \quad (21)$$

где R_k, R — радиусы кривизны клотоиды и круговой кривой;

K — постоянная, определяющая изменение радиуса кривизны (параметр клотоиды);

S — расстояние от начала клотоиды, соответствующей ТНП, до текущей позиции;

l_k — длина переходной кривой (клотоиды).

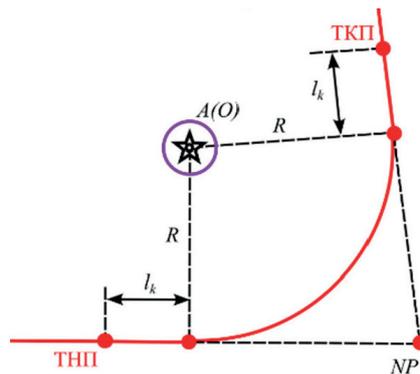


Рис. 10. Схема круговой и переходной кривых

Длина клотоиды может быть выбрана из маневренных элементов судна как функция от угла перекладки руля и расстояния, проходимого до достижения требуемого радиуса кривизны траектории и определяется также соотношением скорости судна относительно грунта и угловой скорости поворота. Длину переходной кривой целесообразно принять равной начальной поворотливости судна, т. е. до двух с половиной от его длины: $l_k \leq 2,5 L$ (Рез. MSC.137(76)).

При нулевой длине переходной кривой радиус кривизны клотоиды соответствует бесконечности (в точке сопряжения прямолинейного участка и клотоиды). Радиус кривизны клотоиды (в точке

сопряжения клотоиды и дуги окружности) подбирается изменением длин переходной кривой и радиуса круговой кривой. Параметр клотоиды можно выразить через расчетную скорость движения и принятую величину нарастания центростремительного ускорения:

$$K = \sqrt{\frac{V^3}{47C}}, \quad (22)$$

где V — расчетная скорость движения, км/ч;

C — величина нарастания центростремительного ускорения, м/с³;

47 — коэффициент перехода из км/ч в м/с.

Геометрия клотоиды подходит для задания криволинейной траектории при движении судна с постоянной скоростью ($K = \text{const}$). Тогда из выражений (16), (22) минимально-допустимую длину клотоиды можно рассчитать из следующего выражения:

$$l_k = \frac{V^3}{47CR}. \quad (23)$$

Для контроля движения по криволинейной клотоидой траектории из выражения (16) при заранее заданном значении параметра клотоиды ($K = \text{const}$) получается тождество запланированного поворота, нарушение которого требует действий по переключке руля (влево / вправо), а с учетом выражения (1) — следующий текущий радиус кривизны:

$$K^2 = Rl_k = SR_k = \text{const}; R_k = \frac{V}{r}. \quad (24)$$

Поворот и параллельный перенос начала координат. Расположения систем навигационных ориентиров, совпадающих с центром принятой системы координат (см. рис. 4, 6, 8, 9), являются частными случаями в судовождении. При представлении этими кривыми (5), (10), (15) траекторий движения судна на любых участках маршрута необходимы аффинные преобразования переноса и поворота системы координат, связанной с ориентирами, в положения, определяющие планируемые ЛЗП (см. рис. 4, 6, 8, 9). При этом перенос определяется приращениями локальных прямоугольных или географических координат, а угол поворота оси, связанной с ориентирами, — разностью ее направлений относительно меридиана рис. 11 [27]:

$$\vec{S} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2} = \sqrt{\Delta X'^2 + \Delta Y'^2} = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} = \sqrt{\Delta \varphi^2 + \Delta w^2}; \beta = \Pi_{X'} - \Pi_X, \quad (25)$$

где $\Delta X, \Delta Y, \Delta X', \Delta Y'$ — относительные переносы систем координат;

\vec{S}, β — перенос и угол поворота системы координат, связанной с ориентирами;

$\Delta \varphi, \Delta w$ — разность широт и отшествие географических координат переноса начала системы координат в требуемое положение; $\Pi_{X'}, \Pi_X$ — направления осей до и после поворота.

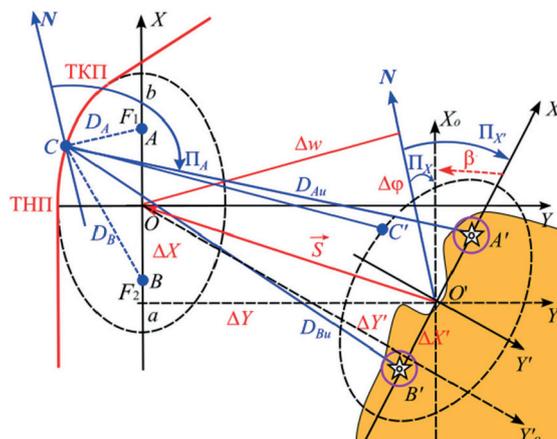


Рис. 11. Перенос и поворот системы координат относительно центра базы навигационных ориентиров

Координаты криволинейных траекторий (12), (17) после поворота и переноса системы координат относительно исходной системы, связанной с ориентирами ($O'X'Y'$), определяются выражениями:

$$x = x' \cos - y' \sin - \Delta X ; y = x' \sin + y' \cos + \Delta Y . \quad (26)$$

Взаимосвязь пеленгов и дистанций с судна на навигационные ориентиры (A', B') в процессе его движения по криволинейной ЛЗП с координатами ориентиров определяется из соответствующих локсодромических треугольников, образованных положением судна и ориентиров (см. рис. 11):

$$D_{Au} = \sqrt{\Delta\varphi_A^2 + \Delta w_A^2} ; \operatorname{tg} \Pi_A = \frac{\Delta w_A}{\Delta\varphi_A} ; D_{Bu} = \sqrt{\Delta\varphi_B^2 + \Delta w_B^2} ; \operatorname{tg} \Pi_B = \frac{\Delta w_B}{\Delta\varphi_B} . \quad (27)$$

Выводы (Summary)

На основе выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение кривых второго порядка во взаимосвязи с конфигурацией расположения ориентиров и криволинейного участка ЛЗП в современных навигационных комплексах позволит расширить спектр применимости лоцманских и автоматических методов планирования и контроля движения судна по НП, что очень важно для перспективного автономного судовождения.

2. В дальнейшем подлежит изучению проблема наилучшего выбора взаимного расположения навигационных ориентиров для аппроксимируемого участка маршрута с оценкой оптимального выбора традиционно измеряемых НП (пеленг и дистанция), например, с точки зрения наилучшей точности проводки судна или простоты контроля движения судна по НП.

3. Актуальным является рассмотрение иных вариантов кривых, позволяющих аналитически задавать физически реализуемые программные траектории, в том числе во взаимосвязи с предполагаемыми силовыми воздействиями в целях повышения безопасности традиционного и автономного судовождения в стесненных и портовых водах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Азаров М. М.* Методы и алгоритмы автоматического управления движением судов по линии заданного радиуса поворота / М. М. Азаров, В. И. Ляпин, О. Б. Кудинов // Системы управления и обработки информации. — 2016. — № 4 (35). — С. 28–47.

2. *Васьков А. А.* Формирование траектории движения судна / А. А. Васьков // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион, техн. науки : проблемы водного транспорта. — 2004. — Спецвып. — Ч. 1. — С. 14–16.

3. *Васьков А. С.* Анализ процесса одерживания поворота судна / А. С. Васьков, А. Н. Штанько, А. В. Еськова // Морские интеллектуальные технологии. — 2022. — № 3–1 (57). — С. 71–76. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.009.

4. *Васьков А. С.* Проблемы контроля поворота судна / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Эксплуатация морского транспорта. — 2011. — № 3 (65). — С. 17–20.

5. *Васьков А. С.* Контроль движения судна по навигационным параметрам и параллельным индексам / А. С. Васьков, А. А. Мироненко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.

6. *Ворохобин И. И.* Плотность распределения векториальной погрешности поворота судна / И. И. Ворохобин, В. В. Северин, Ю. В. Казак // Эксплуатация морского транспорта. — 2017. — № 3 (84). — С. 65–69.

7. *Гриняк В. М.* Планирование маршрутов судов через акватории с интенсивным движением / В. М. Гриняк, А. В. Шуленина, Л. И. Прудникова, А. С. Девятисильный // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. — 2021. — Т. 9. — № 2 (33). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018.

8. *Довгоброд Г. М.* Упрощенное построение закона управления, обеспечивающего движение объекта по заданной криволинейной траектории / Г. М. Довгоброд, Л. М. Клячко // Гироскопия и навигация. — 2011. — № 3 (74). — С. 24–33.

9. *Каретников В. В.* К вопросу оценки рисков использования безэкипажных средств водного транспорта на участке акватории / В. В. Каретников, С. В. Козик, А. А. Буцанец // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.

10. Корнев А. С. Формирование траекторий движения безэкипажного судна / А. С. Корнев, С. П. Хабаров, А. Г. Шпекторов // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 4–1 (54). — С. 158–165. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.047.
11. Мироненко А. А. Методология формирования навигационной обстановки и программирования движений судна / А. А. Мироненко. — Новороссийск: РИО ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2016. — 162 с.
12. Песков Ю. А. Руководство по «Организации мостика» для судов / Ю. А. Песков. — Новороссийск: НГМА, 2002. — Т. 1. — 146 с.
13. Смоленцев С. В. Проблема прогнозирования траекторий движения судов в акватории / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков, М. Б. Солодовниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.
14. Таратынов В. П. Судовождение в стесненных водах / В. П. Таратынов. — М.: Транспорт, 1980. — 128 с.
15. Ююкин И. В. Оптимальная сплайн-траектория информативного маршрута судна в корреляционно-экстремальной навигации / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
16. Benedict K. Simulation-Augmented Methods for Safe and Efficient Manoeuvres in Harbour Areas / K. Benedict, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, M. Baldauf // TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2016. — Vol. 10. — № 2. — Pp. 193–201. DOI: 10.12716/1001.10.02.02.
17. Bowditch N. American Practical Navigator / N. Bowditch. — Bethesda, Maryland: National imagery and mapping agency, 2012. — 898 p.
18. House D. J. Command Companion of Seamanship Techniques / D. J. House. — London, New York: Routledge, 2011. — 235 p.
19. Sivriu G. Planning and execution of blind pilotage and anchorage / G. Sivriu, S. Georgescu // Constanta Maritime University Annals. — 2010. — Vol. 14. — Pp. 35–40.
20. Swift A. I. Bridge team management. A Practical Guide / A. I. Swift. — Southall, Meddlesex: O’Sullivan Printing, 2004. — 118 p.
21. Жмур А. А. Применение теории владения ситуацией при изучении отчетов о расследованиях случаев посадки судов на мель / А. А. Жмур, В. А. Логиновский // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.
22. Ernstsen J. Human Error in Pilotage Operations / J. Ernstsen, S. Nazir // TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. — 2018. — Vol. 12. — № 1. — Pp. 49–56. DOI: 10.12716/1001.12.01.05
23. Jurdzinski M. Causes of ships groundings in terms of integrated navigation model / M. Jurdzinski // Annual of navigation. — 2017. — No. 24. — Pp. 119–135. DOI: 10.1515/aon-2017-0009.
24. Report on the investigation of the grounding of the ultra-large container vessel. CMA CGM Vasco de Gama Thorn Channel, Southampton, England. 22 August 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/59ef2327ed915d6aaafc2ef0/MAIBInvReport23_2017.pdf (дата обращения 28.09.2022).
25. Bole A. Radar and ARPA Manual Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users / A. Bole, A. Wall, A. Norris. — UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013. — 552 p.
26. Васьков А. С. Основы геометрии земного эллипсоида и картографии в судовождении: Уч. пособие / А. С. Васьков, А. А. Мироненко. — Новороссийск: ГМУ им. адм. Ф. Ф. Ушакова, 2022. — 114 с.
27. Мореходные таблицы (МТ-2000). № 9011. — СПб.: ГУНиО МО РФ, 2002. — 576 с.
28. Довгоброд Г. М. Универсальный измеритель скорости поворота для морских и речных судов / Г. М. Довгоброд // Морское оборудование и технологии. — 2020. — № 2 (23). — С. 14–16.

REFERENCES

1. Azarov, M. M., V. I. Lyapin, and O. B. Kudinov. “Methods and algorithms of automatic control of ship motion at preset turning radius.” *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* 4(35) (2016): 28–47.
2. Vas’kov, A.A. “Formirovanie traektorii dvizheniya sudna.” *Izv. Vuzov. Sev.-Kavkaz. region. Tekhn. Nauki. Problemy vodnogo transp Spetsvyp* (2004): 14–16.

3. Vas'kov, Anatoliy S., Aleksandr N. Shtanko, and Anna V. Eskova. "Analysis of the process of obsessing the turning of the vessel." *Marine intellectual technologies* 3–1(57) (2022): 71–76. DOI: 10.37220/MIT.2022.57.3.009.
4. Vaskov, A. S., and A. A. Mironenko. "The problems of the vessel's course alteration control." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(65) (2011): 17–20.
5. Vas'kov, Anatoliy S., and Aleksandr A. Mironenko. "The ship motion control by navigational parameters and parallel indexes." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 826–836. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-826-836.
6. Vorokhobin, I., V. Severin, and Y. Kazak. "Density distribution vectorial error turn ship." *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(84) (2017): 65–69.
7. Grinyak, V.M., A. V. Shulenina, L. I. Prudnikova, and A. S. Devyatisilnyi. "Ships route planning on heavy-traffic marine area." *Modeling, optimization and information technology* 9.2(33) (2021). DOI: 10.26102/2310-6018/2021.33.2.018.
8. Dovgobrod, G. M., and L. M. Klyachko. "Simplified deduction of control law providing a vehicle's motion on a specified nonlinear path." *Gyroscopy and Navigation* 3(74) (2011): 24–33.
9. Karetnikov, Vladimir V., Sergey V. Kozik, and Artem A. Butsanets. "Risks assessment of applying unmanned means of water transport in the water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 987–1002. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-987-1002.
10. Korenev, Alexei S., Sergei P. Khabarov, and Andrei G. Shpectorov. "A route calculation for unmanned vessel." *Marine intellectual technologies* 4–1(54) (2021): 158–165. DOI: 10.37220/MIT.2021.54.4.047.
11. Mironenko, A. A. *Metodologiya formirovaniya navigatsionnoi obstanovki i programmirovaniya dvizhenii sudna*. Novorossiisk: RIO GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2016.
12. Peskov, Yu. A. *Rukovodstvo po «Organizatsii mostika» dlya sudov*. Vol. 1. Novorossiisk: NGMA, 2002.
13. Smolentsev, Sergey V., Dmitry V. Isakov, and Mikhail V. Solodovnichenko. "The problem of forecasting vessels trajectories in the water area." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 7–16. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-7-16.
14. Taratynov, V. P. *Sudovozhdenie v stesnennykh vodakh*. M.: Transport, 1980.
15. Yuyukin, Igor V. "Optimal spline trajectory of the ship informative route in the map-aided navigation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.2 (2022): 230–247. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-2-230-247.
16. Benedict, Knud, M. Kirchhoff, M. Gluch, S. Fischer, M. Schaub, and M. Baldauf. "Simulation-augmented methods for safe and efficient manoeuvres in harbour areas." *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 10.2 (2016): 193–201. DOI: 10.12716/1001.10.02.02.
17. Bowditch, N. *American Practical Navigator*. Bethesda, Maryland: National imagery and mapping agency, 2012.
18. House, D. J. *Command Companion of Seamanship Techniques*. London, New York: Routledge, 2011.
19. Sivriu, G., and S. Georgescu. "Planning and execution of blind pilotage and anchorage." *Constanta Maritime University Annals* 14 (2010): 35–40.
20. Swift, A. I. *Bridge team management. A Practical Guide*. Southall, Meddlesex: O'Sullivan Printing, 2004.
21. Zhmur, Andrew A., and Vladimir A. Loginovsky. "Using a situation awareness theory in a study of grounding incident investigations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1200–1210. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1200-1210.
22. Ernstsens, J., and S. Nazir. "Human Error in Pilotage Operations." *TransNav the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation* 12.1 (2018): 49–56. DOI: 10.12716/1001.12.01.05
23. Jurdziński, Mirosław. "Causes of Ships Groundings in Terms of Integrated Navigation Model." *Annual of Navigation* 24 (2017): 119–135. DOI: 10.1515/aon-2017-0009.
24. Report on the investigation of the grounding of the ultra-large container vessel. Web. 28 Sept. 2022 <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/59ef2327ed915d6aaafc2ef0/MAIBInvReport23_2017.pdf>.
25. Bole, A., A. Wall, and A. Norris. *Radar and ARPA Manual Radar, AIS and Target Tracking for Marine Radar Users*. UK, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.
26. Vas'kov, A. S., and A. A. Mironenko. *Osnovy geometrii zemnogo ellipsoida i kartografii v sudovozhdenii*. Novorossiisk: GMU im. adm. F. F. Ushakova, 2022.
27. *Morekhodnye tablitsy (MT-2000). № 9011*. SPb.: GUNiO MO RF, 2002.
28. Dovgobrod, G. M. "Universal Turn Speed Meter for Sea and River Vessels." *Morskoe oborudovanie i tekhnologii* 2(23) (2020): 14–16.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Васьков Анатолий Семёнович —
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Государственный морской
университет имени адмирала Ф. Ф. Ушакова
353922, Российская Федерация, г. Новороссийск,
пр. Ленина, 93
e-mail: as.vaskov@mail.ru

Мироненко Александр Анатольевич —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова
198035, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: alex_mironenko@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vas'kov, Anatoliy S. —
Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Ushakov State
Maritime University
93 Lenin Ave., Novorossiysk, 353918,
Russian Federation
e-mail: as.vaskov@mail.ru

Mironenko, Aleksandr A. —
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: alex_mironenko@mail.ru, kaf_nav@gumrf.ru

*Статья поступила в редакцию 5 марта 2023 г.
Received: March 5, 2023.*