

Виноградов Владимир Николаевич, д-р техн. наук, профессор кафедры
«Судовождение и промышленное рыболовство»

Ивановский Николай Владимирович, канд. техн. наук, доцент кафедры
«Судовождение и промышленное рыболовство»

Горячев Иван Сергеевич, начальник лоцманской службы (порт Керчь), старший преподаватель кафедры
«Судовождение и промышленное рыболовство»

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»
298309, Республика Крым, г. Керчь, ул. Орджоникидзе, 82

СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА ПРИ ПРОВОДКЕ СУДНА В ЗАДАННОЙ АКВАТОРИИ С УЧЕТОМ ТЕЧЕНИЯ

Ключевые слова: безопасность судоходства, оценка риска, математическая модель морского судна, автоматическое управление.

Аннотация: В статье рассматривается задача синтеза алгоритма управления судном по критерию среднеквадратической величины риска безопасного прохода узкого пролива при наличии течения и проводится последующий его анализ. В качестве примера для синтезированного алгоритма проведено статистическое моделирование расчета риска безопасного прохождения пролива.

Расчет риска безопасного прохода судна узкого канала проводился при наличии течения для различных случайных параметров. Следует отметить, что даже при максимальном значении отклонений случайных параметров (максимальном риске) система оптимального управления обеспечивает нахождения характеристик движения судна в заданных (безопасных) пределах.

Применение полученных результатов исследований позволит снизить влияние человеческого фактора при принятии решений в задачах, связанных с управлением морским судном. Результаты исследований, приведенные в данной работе, могут быть использованы для построения автоматических систем управления.

Введение

При прохождении судном узкостей при наличии течения последнее оказывает существенное влияние на параметры движения судна. Алгоритм управления судном автоматизированной системой судовождения должен учитывать текущие характеристики течения в проливе (модуль скорости, направления течения). Для разработки оптимальных алгоритмов управления судном необходимо для заданного пролива, типа судна и характеристик течения предварительно рассчитать переносную скорость воды и ускорения (линейные и угловое) вызванные течением и уточнить модель движения судна при наличии течения. В работах [1–3] авторами были разработаны алгоритмы проводки судна в заданной акватории на спокойной воде, которые послужили основой для данного исследования.

Постановка задачи синтеза

Управляемое движение судна в горизонтальной плоскости при наличии течения определяется системой нелинейных уравнений [6]:

– уравнения движения в местной прямоугольной системе координат (МПСК)

$$\frac{dx}{dt} = v_x \cos(\psi) - v_y \sin(\psi) + v_T \cos(\psi_T(x))$$

$$\frac{dy}{dt} = v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi) + v_T \sin(\psi_T(x))$$

– уравнения движения судна в связанной системе координат (ССК)

$$\frac{dv_x}{dt} = (F_{xT}(v_y, \omega_z) + F_{xg}(v_x, v_y, \omega_z) + F_{xT}(v_x, v_y, \omega_z, \delta) + T_v(v_x, v_y, n_{об})) / m_{11} + a_{xT},$$

$$\frac{dv_y}{dt} = (F_{yT}(v_x, \omega_z) + F_{yg}(v_x, v_y, \omega_z) + F_{yT}(v_x, v_y, \omega_z, \delta)) / m_{22} + a_{yT},$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \omega_z,$$

$$\frac{d\omega_z}{dt} = (M_{zT}(v_x, v_y, \omega_z) + M_{zg}(v_x, v_y, \omega_z) + M_{zT}(v_x, v_y, \omega_z, \delta)) / J_z + a_{\omega T},$$

$$X(t_0) = (x(t_0), y(t_0), v_x(t_0), v_y(t_0), \psi(t_0), \omega_z(t_0)), \quad (1)$$

где v_T – модуль скорости течения;

$\psi_T(x)$ – угол курса течения на линии фарватера.

Линейные и угловое ускорения от течения определяются выражениями

$$\begin{aligned} a_{xT} &= -v_T((m_{22}/m_{11}+1)\omega_z - \omega_T)\sin(\psi_T(x) - \psi), \\ a_{yT} &= -v_T((m_{11}/m_{22}-1)\omega_z + \omega_T)\cos(\psi_T(x) - \psi), \end{aligned} \quad (2)$$

$$a_{\omega T} = -v_T(m_{22}-m_{11})(v_x \cos(\psi_T(x) - \psi) - v_x \sin(\psi_T(x) - \psi) - v_T \cos(\psi_T(x) - \psi) \sin(\psi_T(x) - \psi)) / J_z,$$

где ω_T – угловая скорость поворота течения на линии фарватера

$$\omega_T = \frac{d\psi_T(x)}{dx} \frac{dx}{dt} = \frac{d\psi_T(x)}{dx} (v_x \cos(\psi) - v_y \sin(\psi) + v_T \cos(\psi_T(x))) \quad (3)$$

Задача синтеза алгоритма управления судном состоит в том, что в процессе движения судна необходимо по оцениваемым текущим параметрам движения $\hat{X}(t_i) = (\hat{x}(t_i), \hat{y}(t_i), \hat{v}_x(t_i), \hat{v}_y(t_i), \hat{\psi}(t_i), \hat{\omega}_z(t_i))$, (вектора положения, скорости, угловое положение и угловая скорость вращения судна) формировать вектор управляющих воздействий $U(t)$, (команды на угловое положение руля судна) так, чтобы истинные параметры движения судна $X(t) = (x(t), y(t), v_x(t), v_y(t), \psi(t), \omega_z(t))$ возможно точнее воспроизводили желаемые параметры $X_{ж}(t) = (x_{ж}(t), y_{ж}(t), v_{xж}(t), v_{yж}(t), \psi_{ж}(t), \omega_{zж}(t))$ исходя из критерия минимизации величины риска

$$R = \int \left[F(\Delta P) \frac{1}{T} \int_{t_0}^T [\Delta X(\tau) Q(\tau) \Delta X^T(\tau) + q(\tau) \delta(\tau)^2] dt \right] d\Delta P,$$

где M – оператор вычисления среднего значения,

$\Delta X(t) = X_{ж}(t) - X(t)$,

$\delta(\tau)$ – управляющее воздействие на временном интервале управления $t_0 \leq \tau \leq T$.

Задача синтеза решается в предположении, что модель движения судна линеаризована относительно опорного движения, имеются оптимальные линейные оценки параметров судна и текущих параметров движения [2,3], оптимальный алгоритм управления синтезируется в классе линейных алгоритмов [4].

Синтез алгоритма управления

Управляемый случайный процесс $\Delta \hat{X}(t_i) = (X_{ж}(t) - \hat{X}(t_i), P_o - \hat{P}(t_i))$, согласно [2,3], удовлетворяет векторному линеаризованному рекуррентному стохастическому уравнениям вида

$$\Delta \hat{X}(t_i) = L_T(t_i, t_{i-1}) \Delta \hat{X}(t_{i-1}) + B(t_i) \Delta U(t_i) + \Sigma(t_i) \xi(t_i), \quad \Delta \hat{X}(t_0) = 0, \quad (4)$$

где матрица перехода $L_T(t_i, t_{i-1})$ с учетом наличия течения определяется выражением

$$L_T(t_i, t_{i-1}) = \begin{bmatrix} I + (A_x(L) + A_{xT}(L))dt, & (A_p(L) + A_{pT}(L))dt \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (5)$$

Элементы матриц $A_{xT}(\dots)$, $A_{pT}(\dots)$ являются частными производными переносных скоростей воды и ускорений от течения по координатам вектора $X(t)$.

Не нулевые элементы матрицы $A_{xT}(\dots)$ имеют вид

$$A_{xT11} = -v_T \sin(\psi_T(x)) \frac{d\psi_T(x)}{dx}, \quad A_{xT21} = v_T \cos(\psi_T(x)) \frac{d\psi_T(x)}{dx}$$

$$A_{xT31} = -v_T((m_{22}/m_{11}+1)\omega_z - \omega_T) \cos(\psi_T(x) - \psi) \frac{d\psi_T(x)}{dx} + v_T \sin(\psi_T(x) - \psi) \frac{\partial \omega_T}{\partial x}$$

$$A_{xT41} = -v_T((m_{11}/m_{22}-1)\omega_z + \omega_T) \sin(\psi_T(x) - \psi) \frac{d\psi_T(x)}{dx} + v_T \cos(\psi_T(x) - \psi) \frac{\partial \omega_T}{\partial x},$$

$$A_{xT33} = v_T \sin(\psi_T(x) - \psi) \cos(\psi) \frac{d\psi_T(x)}{dx}, \quad A_{xT43} = -v_T \cos(\psi_T(x) - \psi) \cos(\psi) \frac{d\psi_T(x)}{dx}$$

$$\begin{aligned}
 A_{x34} &= -v_T \sin(\psi_T(x) - \psi) \sin(\psi) \frac{d\psi_T(x)}{dx}, & A_{x44} &= v_T \cos(\psi_T(x) - \psi) \sin(\psi) \frac{d\psi_T(x)}{dx}, \\
 A_{x35} &= -v_T \sin(\psi_T(x) - \psi) (v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi)) \frac{d\psi_T(x)}{dx} + v_T ((m_{22} / m_{11} + 1) \omega_z - \omega_T) \cos(\psi_T(x) - \psi), \\
 A_{x45} &= -v_T \cos(\psi_T(x) - \psi) (v_x \sin(\psi) + v_y \cos(\psi)) \frac{d\psi_T(x)}{dx} - v_T ((m_{11} / m_{22} - 1) \omega_z + \omega_T) \sin(\psi_T(x) - \psi), \\
 A_{x36} &= -v_T (m_{22} / m_{11} + 1) \sin(\psi_T(x) - \psi), & A_{x46} &= -v_T (m_{11} / m_{22} - 1) \cos(\psi_T(x) - \psi), \\
 A_{xT61} &= v_T (m_{22} - m_{11}) (v_x \sin(\psi_T(x) - \psi) - v_y \cos(\psi_T(x) - \psi) - v_T (1 - 2 \cos^2(\psi_T(x) - \psi))) \frac{d\psi_T(x)}{dx} / J_z, \\
 A_{x63} &= v_T (m_{22} - m_{11}) \sin(\psi_T(x) - \psi), & A_{x64} &= -v_T (m_{22} - m_{11}) \cos(\psi_T(x) - \psi), \\
 A_{x65} &= v_T (m_{22} - m_{11}) (v_x \cos(\psi_T(x) - \psi) + v_y \sin(\psi_T(x) - \psi) + v_T (\cos^2(\psi_T(x) - \psi) - 1)),
 \end{aligned}$$

где

$$\frac{\partial \omega_T}{\partial x} = \frac{d^2 \psi_T(x)}{dx^2} (v_x \cos(\psi) - v_y \sin(\psi) + v_T \cos(\psi_T(x)) - v_T \sin(\psi_T(x)) \left(\frac{d\psi_T(x)}{dx} \right)^2) \quad (6)$$

Не нулевые элементы матрицы $A_{pT}(\dots)$ имеют вид

$$\begin{aligned}
 A_{pT37} &= v_T m_{22} \omega_z \sin(\psi_T(x) - \psi) / m_{11}^2, & A_{pT38} &= -v_T \omega_z \sin(\psi_T(x) - \psi) / m_{11} \\
 A_{pT47} &= -v_T \omega_z \cos(\psi_T(x) - \psi) / m_{22}, & A_{pT48} &= v_T m_{11} \omega_z \cos(\psi_T(x) - \psi) / m_{22}^2 \\
 A_{pT67} &= v_T (v_y \cos(\psi_T(x) - \psi) - v_x \sin(\psi_T(x) - \psi) - v_T^* \cos(\psi_T(x) - \psi) \sin(\psi_T(x) - \psi)) / J_z, \\
 A_{pT68} &= -A_{pT67}, & A_{pT69} &= -a \omega_T J_z.
 \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения задачи синтеза будем использовать метод динамического программирования Беллмана Р. [5], применительно к линеаризованным стохастическим процессам [4]. Оптимальный вектор управляющих воздействий определяется выражением

$$U^*(t_i) = U_0(t_i) + S_T(t_i) \Delta \hat{X}_r(t_i). \quad (8)$$

Матрица коэффициентов усиления управляющего устройства $S_T(t_i)$ определяется через матрицу функции Беллмана $R_T(t_{i+1})$ выражением

$$S_T(t_i) = - (G(t_i) + B^T(t_i) R_T(t_{i+1}) B(t_i))^{-1} B^T(t_i) R_T(t_{i+1}) L_T(t_{i+1}, t_i), \quad (9)$$

матрица $R_T(t_{i+1})$ удовлетворяет рекуррентному уравнению

$$R_T(t_i) = L_T^T(t_{i+1}, t_i) R_T(t_{i+1}) L_T(t_{i+1}, t_i) + Q(t_i) - S_T^T(t_i) (G(t_i) + B^T(t_i) R_T(t_{i+1}) B(t_i)) S_T(t_i), \quad (10)$$

при граничном условии $R_T(T) = 0$.

Анализ точности алгоритма управления

Анализ точности алгоритмов проводился методом статистического моделирования для судна типа «Волга-Балт» при проходе Керченского – Еникальского канала при двух вариантах течения:

Вариант № 1 – течение помогающее проходу пролива

- модуль вектора скорости течения $v_T=1$ м/с,
- угол курса течения $\psi_T(x)= -0.0006181$ х [рад].

Вариант № 2 – течение мешающее проходу пролива

- модуль вектора скорости течения $v_T=0.5$ м/с,
- угол курса течения $\psi_T(x)= 0.0006181$ х [рад].

Параметры и характеристики движения судна определялись в соответствии с [7].

В качестве управляющего воздействия рассматривалось угловое положение руля судна $U(t)= \delta(t)$, число оборотов двигателя судна считалось постоянным ($n_{06}=3,5$ об/с). В качестве риска управления при проходе узкого пролива рассматривался

$$R_U = \int_0^T [q_{22} (y_{ж}(\tau) - \hat{y}(\tau))^2 + q_{44} (v_{yж}(\tau) - \hat{v}_y(\tau))^2 + q_{55} (\psi_{ж}(\tau) - \hat{\psi}(\tau))^2 + g \delta^2(\tau)] d\tau \quad (11)$$

где $q_{22}=0.04$ [1/м²], $q_{44}=100$ [м²/с²], $q_{55}=3600$ [1/рад²], $g=4$ [1/рад²].

Оптимальное угловое положение руля судна формировалось согласно выражению

$$\delta(t) = \delta_0(t) + s_2(t)(v_{ж}(t) - \hat{y}(t)) + s_4(t)(v_{yж}(t) - \hat{v}_y(t)) + s_5(t)(\Psi_{ж}(t) - \hat{\psi}(t)). \quad (12)$$

На рис. 1–3 приведены коэффициенты усиления оптимального алгоритма управления судном при проходе узкого пролива при наличии течения (красный цвет Вариант №1).

S₂

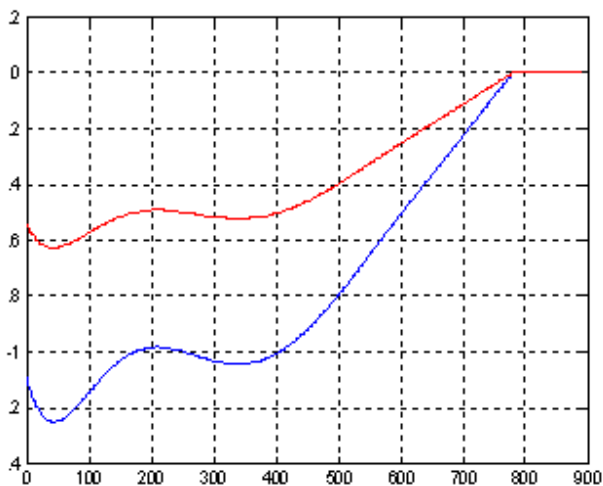


Рис. 1. Коэффициент усиления по положению
Figure 1 – Gain of the position

S₄

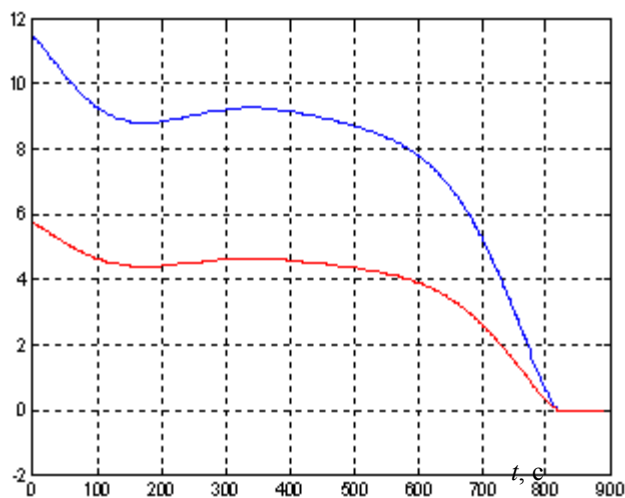


Рис. 2. Коэффициент усиления по скорости
Figure 2 – The gain in speed

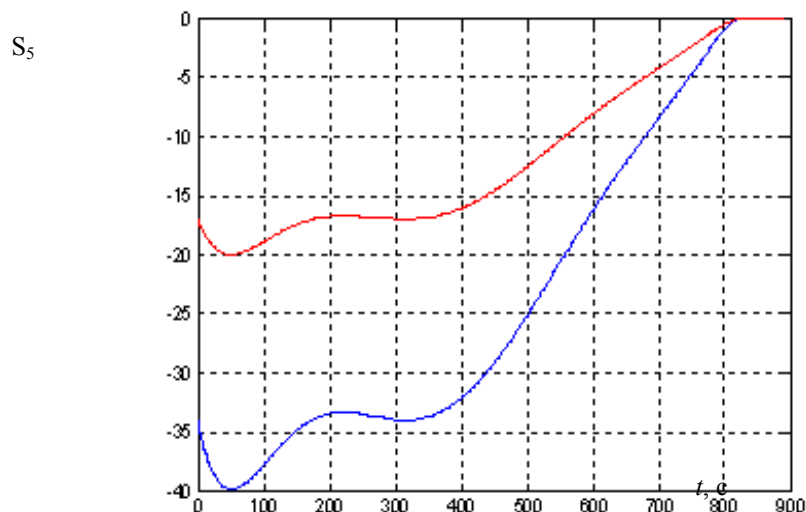


Рис. 3. Коэффициент усиления по курсу
Figure 3 – Gain at the rate

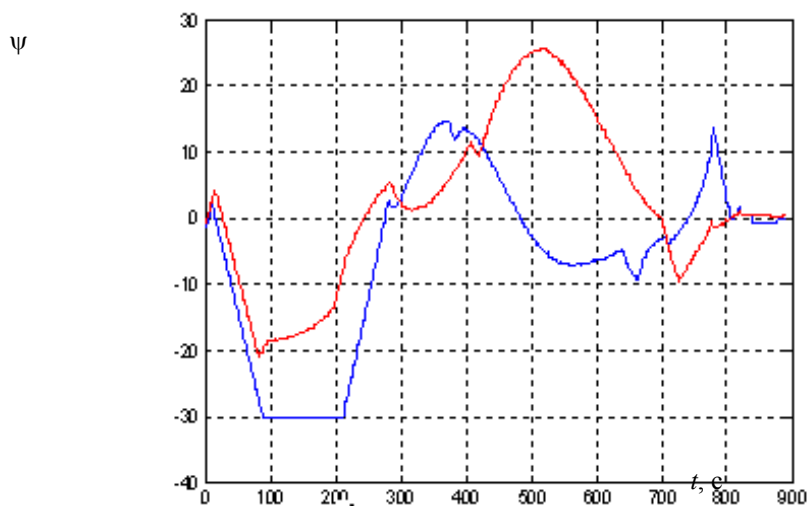


Рис. 4. Угол перекадки руля
Figure 4 – steering angle

Расчет риска безопасного прохода узкого канала при наличии течения проводился для 10% значения отклонений случайных параметров $P = [m_{11}, m_{22}, J_z]$ от расчетных методом статистического моделирования и определялась гистограмма риска и её аппроксимация дифференциальным законом распределения Вейбулла.

На рис. 5–7 приведены гистограммы рисков и соответствующие им интегральные законы распределения Вейбулла. На Рис. 8 приведены траектории судна прохода Керченского – Еникальского канала при двух вариантах течения.

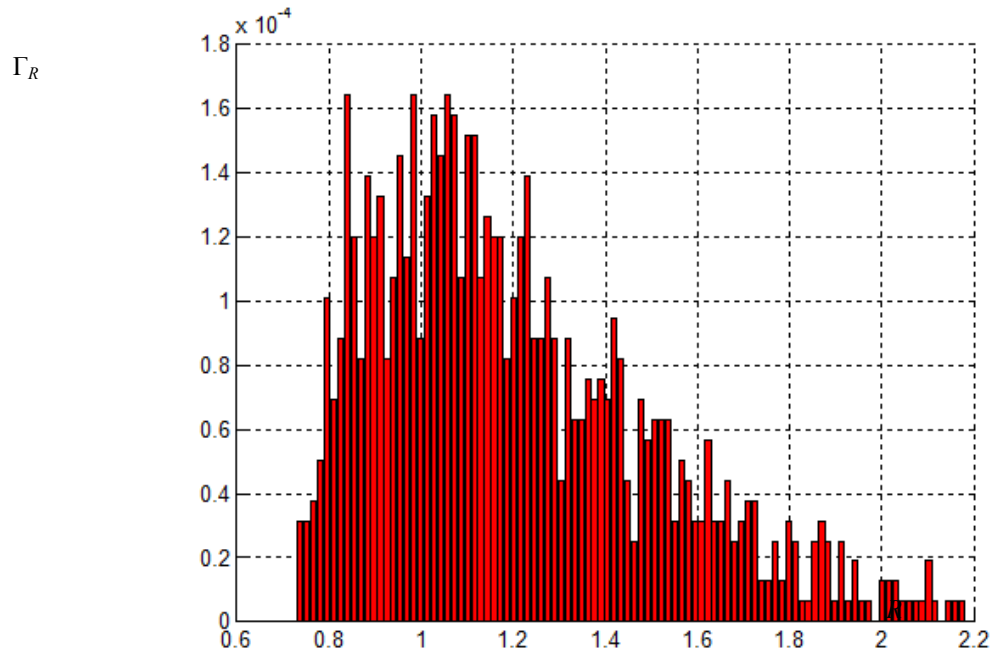


Рис. 5. Гистограмма риска Figure 5 – Histogram of risk

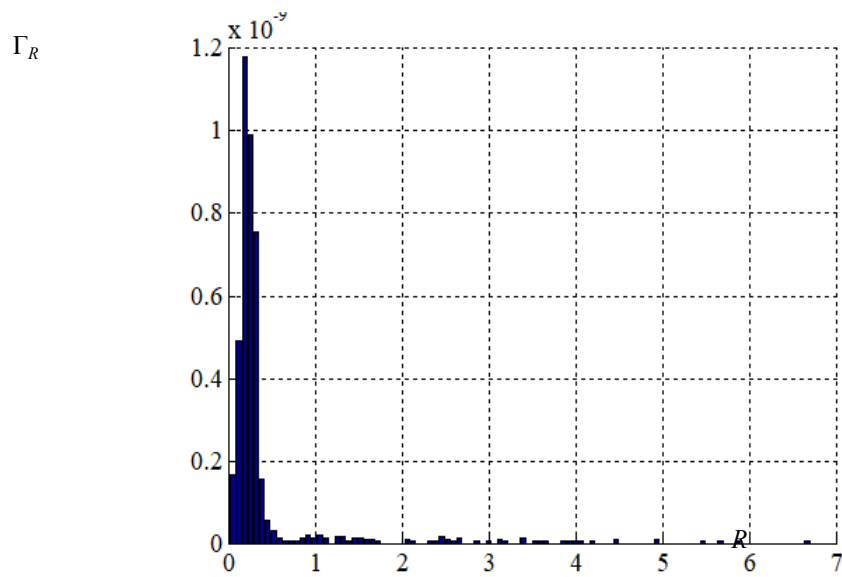


Рис. 6. Гистограмма риска Figure 5 – Histogram of risk

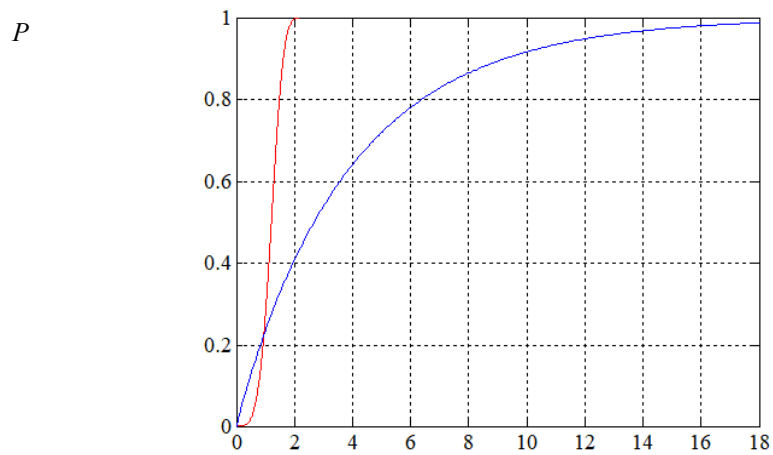


Рис. 7. Интегральные законы Вейбулла рисков
Figure 7 – Integral Weibull laws

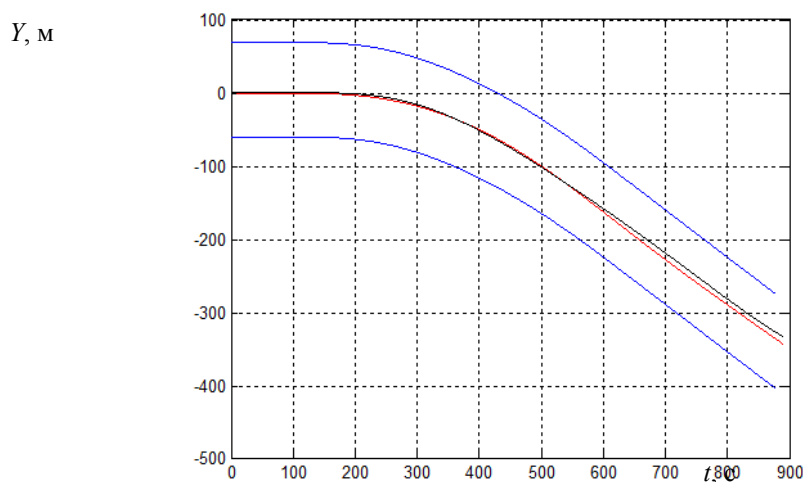


Рис. 8. Траектории судна при различном течении
Figure 8 – Trajectory of the vessel at different current

В работе проводился также анализ выхода наиболее выступающей габаритной точки судна [7], [11], [12], за пределы полосы фарватера 30 м при половине ширины пролива 60 м.

Текущее расстояние между габаритной точкой судна и линией фарватера вычислялась по приближенной формуле

$$l_{тг}(t) = y_{ж}(t) - y(t) + (L \sin(|\Psi_{ж}(t) - \hat{\psi}(t)|) + B \cos(\Psi_{ж}(t) - \hat{\psi}(t))) \text{sign}(y_{ж}(t) - y(t)), \quad (13)$$

где L и B длина и ширина судна.

Анализ показал, что при риске $R \leq 20000$ с наиболее выступающая габаритная точка судна всегда находится внутри полосы фарватера 30 м.

Выводы

В статье получено решение задачи синтеза алгоритма управления судном при прохождении узких проливов при наличии различных течений. Для синтезированного алгоритма проведено статистическое моделирование расчета риска безопасного прохождения пролива. Так, например, вероятность безопасного прохода Керченского – Еникальского канала судном типа «Волга-Балт» при отклонении вектора случайных параметров $P = [m_{11}, m_{22}, J_{зр}]$ от расчетных до 10%, составляет для вариантов течения №1,2, соответственно, 0.995 и 0.826.

Список литературы:

- [1] Виноградов В.Н., Ивановский Н.В. Синтез алгоритма управления судном автоматизированной системой судовождения по критерию безопасного прохода узких проливов. Журнал Вестник. Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2019.
- [2] Виноградов В.Н., Ивановский Н.В., Новоселов Д.А. Анализ влияния случайных параметров судна на управляемость и безопасность. Журнал Вестник. Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск 55. Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2018.
- [3] Виноградов В.Н., Ивановский Н.В. Синтез алгоритмов идентификации случайных параметров и оценивания характеристик движения судна. Журнал Вестник. Волжской государственной академии водного транспорта. Выпуск Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ» Н. Новгород, 2018.
- [4] Виноградов В.Н. Корреляционная теория фильтрации и управления многомерными случайными процессами. М: Кранд. 2011.
- [5] Беллман Р. Динамическое программирование /Пер. с англ. под ред. Н. Н. Воробьева. М..1960.
- [6] Справочник по теории корабля. Т.3. Под редакцией Я.И. Войткуновского. Л: «Судостроение», 1985.
- [7] Мореходные таблицы. Санкт-Петербург, 2002.
- [8] Fossen, Thor I., Guidance and Control of Ocean Marine Vehicles. John Wiley and Sons Ltd. New York, 1994.
- [9] Ruoshi Cha, Decheng Wan, Numerical Investigation of Motion Response of Two Model Ships in Regular Waves. Procedia Engineering, Volume 116, 2015, pp. 20-31. DOI:10.1016/j.proeng. 2015.08.260
- [10] Kramar V. Investigation of Changes and Development of Mathematical Model for a Drilling Vessel. Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, pp.0049-0055, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-07-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI:10.2507/26th.daaam.proceedings.007

[11] Maltsev A.S. Five steps to assure navigational safety.//Collection of IAMU scientific works. –Dalian.: Maritime University Press. -2006. - P. 170–179.

[12] Maltsev A.S. The ways of Enhancing the safety of Navigation// Thesis of the third General assembly of IAMU //Rock port, USA.2002. Sec. II A –p. 16–26.

SYNTHESIS OF THE VESSEL TRAFFIC CONTROL ALGORITHM IN SPECIFIED WATERS BASED ON THE CURRENT

*Vinogradov Vladimir N., Doctor of Engineering Sciences, Professor of the chair
«Navigation and industrial fishing»*

*Ivanovsky Nikolay V., Candidate of Engineering Sciences, associate Professor
of the chair «Navigation and industrial fishing»*

*Goryatchev Ivan S., the head of the pilot service (the Kerch port), Senior
lecturer of the department «Navigation and industrial fishing»
Kerch State Maritime Technological University
82, Ordzhonikidze st, Kerch, 298309, Republic of Crimea*

Keywords: safety of navigation, risk assessment, mathematical model of a marine vessel, automatic control.

The article considers the problem of synthesis of the ship control algorithm according to the criterion of the RMS value of the risk of safe passage through a narrow strait in conditions of a current, and its subsequent analysis is carried out. As an example, for the synthesized algorithm the statistical modeling of calculation of safe strait passage risk was performed. The calculation of safe narrow strait passage risk was carried out for various random parameters in conditions of a current. It should be noted that even with the maximum value of random parameters divergence (maximum risk), the optimal control system ensures that the vessel's traffic characteristics are found within the specified (safe) limits.

The application of the obtained research results will reduce the human factor impact on decision - making in solving the tasks of navigating a marine vessel. The research results given in this paper can be used to design automatic control systems.

References:

- [1] Vinogradov V.N., Ivanovsky N.V. Synthesis of ship control algorithm by automated navigation system according to the criterion of safe passage of narrow Straits. The Journal Gazette. Volga state Academy of water transport. Issue.... Publishing house of the «of UGUST» N. Novgorod, 2019.
- [2] V.N. Vinogradov, N.V. Ivanovsky, D.A. Novoselov. Analysis of the influence of random parameters of the vessel on handling and safety. The Journal Gazette. Volga state Academy of water transport. Issue 55. Publishing house of the "of UGUST» N. Novgorod, 2018.
- [3] Vinogradov V.N., Ivanovsky N.V. Synthesis of algorithms for identification of random parameters and estimation of vessel motion characteristics. The Journal Gazette. Volga state Academy of water transport. Issue Publishing house FGBOU VO «of UGUST» N. Novgorod, 2018.
- [4] V.N. Vinogradov. Correlation theory of filtration and control of multidimensional random processes. M: Krasand. 2011.
- [5] Bellman R. Dynamic programming./Per. from English. under. ed. M. 1960.
- [6] Handbook of ship theory. Vol. 3. Edited by Y. I. Vaitkunas. L: «Shipbuilding», 1985.
- [7] Nautical tables. Saint-Petersburg, 2002.
- [8] Fossen, Thor I., Guidance and Control of Ocean Marine Vehicles. John Wiley and Sons Ltd. New York, 1994.
- [9] Ruoshi Cha, Decheng Wan, Numerical Investigation of Motion Response of Two Model Ships in Regular Waves. Procedia Engineering, Volume 116, 2015, pp. 20-31. DOI:10.1016/j.proeng. 2015.08.260
- [10] Kramar V. Investigation of Changes and Development of Mathematical Model for a Drilling Vessel. Proceedings of the 26th DAAAM International Symposium, pp.0049-0055, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, ISBN 978-3-902734-07-5, ISSN 1726-9679, Vienna, Austria DOI:10.2507/26th.daaam.proceedings.007
- [11] Maltsev A.S. Five steps to assure navigational safety.//Collection of IAMU scientific works. –Dalian.: Maritime University Press. -2006. - P. 170–179.
- [12] Maltsev A.S. The ways of Enhancing the safety of Navigation// Thesis of the third General assembly of IAMU //Rock port, USA.2002. Sec. II A –p. 16–26.

Статья поступила в редакцию 11.10.2019 г.