

Раздел 2 СУДОВОЖДЕНИЕ, ВОДНЫЕ ПУТИ СООБЩЕНИЯ И ГИДРОГРАФИЯ

УДК 656.61
DOI: 10.34046/aumsuomt93/5

БЕЗОПАСНОЕ МАНЕВРИРОВАНИЕ БОЛЕЕ ЧЕМ ОДНОГО СУДНА ПРИ ВХОДЕ НА ФАРВАТЕР ПОРТА, В УЗКОСТИ И УСЛОВИЯХ МАЛОЧИСЛЕННОГО ЭКИПАЖА В КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ Е-НАВИГАЦИИ

А.Н. Попов, кандидат технических наук, доцент

В основу исследования данной статьи положен эргатический принцип функционирования современных интегрированных навигационных систем морского судна. Информационный подход по мнению автора является в настоящее время определяющим, в связи с внедрением в практику современного судоходства концепции e-Navigation. Для оценки информационного обмена в системе «человек-машина» используется понятие информационной энтропии и негэнтропии. Автоматизация процесса принятия решений в процессе расхождения с судами в узкости и на фарватере является одной из ключевых, в связи с внедрением концепции безэкипажного судоходства. Применены вариации закона распределения случайной величины, отнесенной к оптимизации составляющих интегрированных навигационных систем современных морских судов с малочисленным экипажем.

Ключевые слова: эргатический, маневрирование, информационный подход, e-Navigation, энтропия, негэнтропия, вероятность

The ergatic principle of modern integrated navigation systems of a sea-going vessel represents the base of the present research. The author considers that nowadays the information approach is the main method of research due to the implementation of e-Navigation concept in the practice of the modern navigation. For the information assessment the exchange in human-machine system the notion of information entropy and negentropy is used. The automation process in decision making while collisions avoidance actions both in narrows and port fairways is the key taking into account the introduction of unmanned navigation. The variations of probability distribution referring the optimization of integrated navigation system components on modern sea-going ships with a small crew were applied in this research.

Key words: ergatic, maneuvering, information approach, e-Navigation, entropy, negentropy, probability

Отличительной особенностью текущего момента для современного судоходства является интенсивное проникновение информационных технологий на флот и в портовую инфраструктуру, поэтому маневрирование судов в районах интенсивного движения (фарватер, узкость и др.) требует комплексного учета информационной составляющей морской эргатической системы, особенно с учетом внедрения концепции e-Navigation.

Расположим судно через центр масс в системе полярных координат. Тогда относительное движение судна, можно представить в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} D_i &= V_m \cos(\Pi_i - K_{c_i}) - V_H \cos(KY_i) \\ \Pi_i &= \frac{V_H \sin(\Pi_i - K_H) - V_m \sin(KY_i)}{D_i}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$ – количество судов на встречном курсе.

Для безопасного расхождения двух судов

на сходящихся курсах, необходимо выдерживать угловую скорость поворота для изменения курсового угла на величину:

$$\left| \frac{\pi}{2} - |KY_i| \right| > 0. \quad (2)$$

Для гарантированного безопасного расхождения с маневрирующим судном на заданной дистанции $D_{rev.con.}$ с применением теории нелинейной интегральной инвариантности [1]:

$$|\omega_{dis}| \geq \frac{\left| \frac{\pi}{2} - |KY_i| \right| \cdot |V_H \cos |KY_i| + V_m}{D_i - D_{rev.con.}} + \frac{V_m}{D_i}. \quad (3)$$

В соотношении определяются кинематические параметры безопасного расхождения с маневрирующим судном в рабочей зоне e-Navigation [6]. Динамика маневрирования судна коррелируется с кинематическими и гидродинамическими характеристиками движения встречного и попутного судна.

При маневре расхождения, включая маневр последнего момента, определим уклонение по критерию для модуля морской эргатической системы:

$$D_i - \frac{V_m}{K_H - KY_i} \geq 0 \quad (4)$$

Построим математическую модель в модифицированном уравнении рыскания в форме Номото, с рассчитанным для модельного судна коэффициентами: K_ω^δ и τ_i .

Тогда управляющие воздействия (угла перекладки руля):

$$\delta_{dis} = \frac{\omega_{manage}}{1,73 \left(1 - e^{-\frac{s}{3,96}} \right)} \quad (5)$$

где s – безразмерное время, $s = t \frac{V_H}{L_H}$;

L_H – длина судна.

После перекладки руля значение ω_{manage} пересчитывается пошагово сравнительно с датчиком информации расхождения с маневрирующим объектом человеком-оператором (пользователем e-Navigation) или с использованием искусственного интеллекта [2]. Алгоритм системы предупреждения столкновения судов в концепции e-Navigation представлен на рисунке 1 [3].

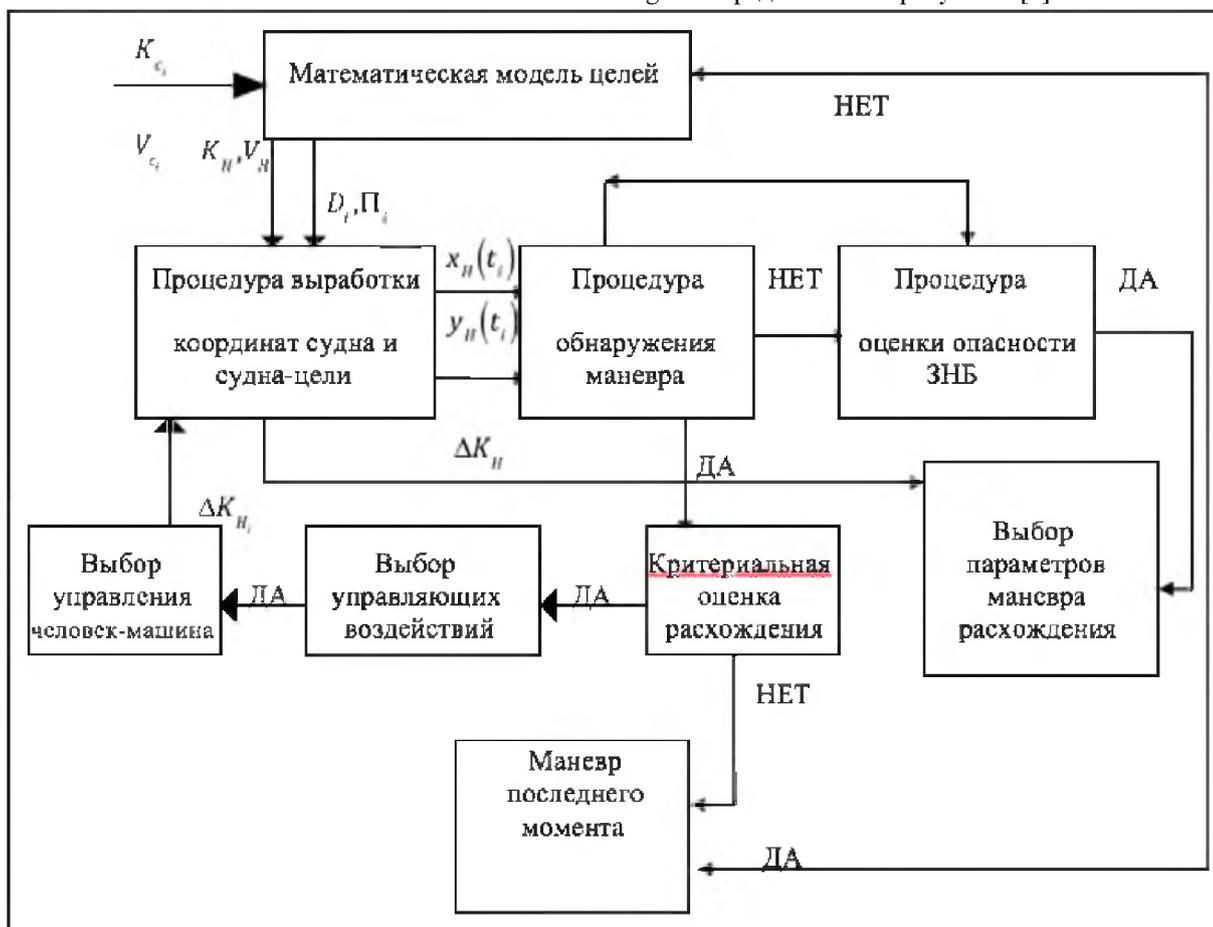


Рисунок 1 – Алгоритм функционирования системы предупреждения столкновения судов

Согласно теории вероятностей и теории информации случайное и детерминированное событие взаимосвязаны. В задачах судовождения вероятность выхода маневрирующего судна за пределы фарватера составляет: $\rho \leq 0,06$. Для определения меры определенности и неопределенности используются понятия энтропии и

негэнтропии.

В экспертных оценках шкалы желательности и нежелательности будет:

$$y = \exp(-\exp(-x)) \quad (6)$$

где \exp – оператор экспоненты.

Каждому случайному событию A , если известна вероятность его наступления

$P(A) = P$, можно поставить в соответствие количество информации, как:

$$H(A) = -p \cdot \log_2(p-g) \cdot \log_2 g, \quad (7)$$

где $g = 1-p, m = 2$.

Если событие достоверно, то:

$$P(A) = 1, g(A) = 0, H(A) = 0. \quad (8)$$

Мера случайного события детерминирована, а величина X , соответствует закону распределения:

$$\frac{x}{p} \quad \frac{x_1}{p} \quad \frac{x_2}{q}. \quad (10)$$

Тогда:

$$H(x) = -\log_2(p-g) \cdot \log_2 g, g = 1-p. \quad (11)$$

Эта зависимость от величины аргумента p , вероятности ($0 \leq p \leq 1$). При соотношении количества информации со шкалой желательности Харрингтона получим статистическое количество информации:

$$H^*(A) = -p^* \cdot \log_2 p^* - q^* \cdot \log_2 q^*. \quad (12)$$

Если x дискретная случайная величина, определяемая законом распределения, то:

$$\frac{x}{p} \quad \frac{x_1}{p} \quad \frac{x_2}{q} \quad \dots \quad \dots. \quad (13)$$

Откуда негэнтропия:

$$H[x] = -\sum_{j=1}^n p_j \cdot \log_2 p_j, \quad (14)$$

Для каждого варианта мерой неопределенности является энтропия числа нахождения на фарватере:

$$H[x_1] = -1/4 \cdot \log_2 1/4 - 1/2 \cdot \log_2 1/2 - 1/4 \cdot \log_2 1/4 = 1,5$$

$$H[x_2] = -1/27 \cdot \log_2 1/27 - 2/9 \cdot \log_2 2/9 - 8/27 \cdot \log_2 8/27 = 1,698. \quad (19)$$

Первое судно своевременно ввело управляющий импульс, поскольку: $H[x_1] < H[x_2]$.

По биномиальному закону распределения, вычисляем негэнтропию, при $p_j = 1/n$:

$$H[x] = -\sum_{i=1}^n 1/n \cdot \log_2 1/n = n \cdot 1/n \cdot \log_2 n = \log_2 n. \quad (20)$$

Откуда:

$$H[x] = \log_2 n. \quad (21)$$

Информация становится монотонно возрастающей функцией n .

Рассмотрим двумерную случайную величину, заданную законом распределения:

y/x	x_1	x_2	\dots	\dots	
y_1	p_{11}	p_{12}	\dots	\dots	
y_2	p_{21}	p_{22}	\dots	\dots	
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	
y_n	p_{m1}	p_{m2}	\dots	\dots	(22)

где x – непрерывная случайная величина с дифференциальной функцией распределения $f(x)$, то:

$$H[x] = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \log_2 f(x) dx, \quad (15)$$

где

$$f(x) \cdot \log_2 f(x) = 0$$

где $f(x) = 0$ при $x = 1$.

Предположим, что два судна входят в порт.

Первое производит два управляющих воздействия, с вероятностью выхода на фарватер 50%. Второе дает три импульса управляющих воздействий с вероятностью выхода на фарватер 30%.

Согласно биномиальному закону распределения, получим:

$$P_n(m) = C_n^m \cdot P^m \cdot (1-p)^{n-m}. \quad (16)$$

Составим закон распределения для первого судна, при $n = 2; p = 1/2$:

$$\frac{x_1}{p} \quad \frac{0}{1/4} \quad \frac{1}{1/2} \quad \frac{2}{1/4}. \quad (17)$$

Для второго судна, при $n = 3; p = 1/3$:

$$\frac{x_2}{p} \quad \frac{0}{1/27} \quad \frac{1}{2/9} \quad \frac{2}{8/27}. \quad (18)$$

где

$(x_i, y_j), i = 1 \dots n, j = 1 \dots m$ – перечень возможных значений;

$p_{ij} = p(x_i, y_j)$ – вероятности их совместного поведения.

События $(x = x_i; y = y_j)$ образуют полную группу, поэтому сумма вероятностей равна единице.

Закон распределения двумерной дискретной случайной величины предполагает определить законы распределения каждой из этих составляющих: $(x = x_i \dots x_n; y = y_j \dots y_m)$.

Тогда:

$$p(x_1) = p(x_1, y_1) + p(x_1, y_2) + \dots + p(x_1, y_m) = \sum_{j=1}^m p(x_1, y_j). \quad (23)$$

Для нахождения вероятности: $p(x = x_n)$ необходимо модифицировать (23).

Тогда условной энтропией случайной величины x относительно случайной величины y для дискретных случайных величин, будет:

$$H[x_i / y_j] = - \sum_{i=1}^n p_{ij} \cdot \log_2 p_{ij}. \quad (24)$$

Для непрерывных случайных величин x и y :

$$H[x / y] = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x / y) \cdot f(x / y) dx. \quad (25)$$

Тогда, средней условной негэнтропией $H[x]$, будет математическое ожидание условной негэнтропии [4]. Для дискретных случайных величин имеем:

$$H[x] = M[H[x / y]] = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p(y_j) \cdot p_{ij} \cdot \log_2 p_{ij}. \quad (26)$$

Так как вероятность:

$$p_i = p(x_i) = \sum_{j=1}^m p(x_i, y_j). \quad (27)$$

То, модифицируя, получим:

$$H[x] = - \sum_{i,j} p_{i,j} \cdot \log_2 \left(\sum_{j=1}^m p_{ij} \right), \quad (28)$$

$$H[y] = - \sum_{ij} p_{i,j} \cdot \log_2 \left(\sum_{i=1}^n p_{ij} \right). \quad (29)$$

Откуда негэнтропия двумерной случайной величины будет:

$$H[x, y] = - \sum_{ij} p_{ij} \cdot \log_2 p_{ij}. \quad (30)$$

В результате сумма энтропий:

$$H[x] + H[y] = - \sum_{ij} p_{ij} \cdot \log_2 \left(\sum_{j=1}^m p_{ij} \sum_{i=1}^n p_{ij} \right) \geq H[x, y]. \quad (31)$$

Таким образом человек-оператор (пользователь e-Navigation) более качественно определяет местоположение в некотором числе точек. Тогда количество информации непрерывной случайной величины находится, как:

$$H[x] = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \log_2 f(x) dx. \quad (32)$$

Сравним несколько законов распределения для условий управляющих воздействий, в рамках

интегрированной навигационной системы мостика маневрирующего судна. Непрерывная дифференциальная величина задана дифференциальной функцией, тогда:

$$f(x) = \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot n}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2}}, \text{ при } M(x) = a, D(x) = \tau^2. \quad (33)$$

Информационный показатель в случае нормального распределения будет τ , тогда, модифицировав, получим:

$$\log_2 f(x) = \log_2 \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot n}} - \frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2} \cdot \log_2 e, \quad (34)$$

$$\begin{aligned} H[x] &= - \int_{-\infty}^{\infty} \left(\log_2 \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \right) \cdot \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2}} dx + \log_2 e \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2}} dx = \\ &= - \log_2 \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2}} dx + \log_2 e \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} (x-a)^2 \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2 \cdot \tau^2}} dx = \\ &= - \log_2 \frac{1}{\tau \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} + \frac{1}{2} \cdot \log e = \log_2 \tau \cdot \sqrt{2 \pi \cdot e}. \end{aligned} \quad (35)$$

Следовательно, при возрастании τ растет и количество информации:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}; a \leq x \leq b \\ 0; x \in [a, b] \end{cases}. \quad (36)$$

Модифицируя рабочие формулы, получим [5]:

$$H[x] = - \log_2 \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b \frac{1}{b-a} dx = \log_2 (b-a), \quad (37)$$

$$H[x] = \log_2 (b-a). \quad (38)$$

Согласно распределению Пуассона, описываем длительность работы различных систем:

$$f(x) = \begin{cases} 0; x < 0 \\ \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}; x > 0 \end{cases}. \quad (39)$$

Найдем информационный объем, задаваемый распределением Пуассона:

$$\log_2 f(x) = \log_2 \lambda - \lambda \cdot x \cdot \log_2 e, \quad (40)$$

$$\begin{aligned} H[x] &= - \int_0^{\infty} (\log_2 \lambda - \lambda \cdot x \cdot \log_2 e) \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda x} dx = - \lambda \cdot \log_2 \lambda \cdot \int_0^{\infty} e^{-\lambda x} dx + \lambda^2 \cdot \log_2 e \cdot \int_0^{\infty} x \cdot e^{-\lambda x} dx = \\ &= - \lambda \cdot \log_2 \lambda \cdot \left(-\frac{1}{\lambda} \right) \cdot e^{-\lambda x} \Big|_0^{\infty} + \lambda^2 \cdot \log_2 e \cdot \frac{1}{\lambda^2} = - \log_2 \lambda + \log_2 e = \log_2 \frac{e}{\lambda} \end{aligned} \quad (41)$$

Количество информации о случайной величине x , полученное в результате наблюдения другой случайной величины y , измеряются разностью энтропии случайной величины и ее средней условной неэнтропии относительно y , получим:

$$I_y[x] = H[x] - H(x). \quad (42)$$

Для дискретных случайных величин:

$$I_y[x] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \cdot \log_2 \frac{P_{ij}}{P_i \cdot P_j}. \quad (43)$$

Тогда:

$$P_{ij} = P(x = x_i, y = y_j) , \tag{44}$$

$$P_i = P(x = x_i), P_j = P(y = y_j) . \tag{45}$$

Если значение случайной величины полностью определено, то:

$$I_y [x] = H(x); H_y [x] = 0 . \tag{46}$$

Если и независимы, то:

$$H_y [x] = H[x]; I_y [x] = 0 . \tag{47}$$

Из симметрии и модификации формул, имеем:

$$I_y [x] = I_x [y]. \tag{48}$$

Служит характеристикой зависимости случайных величин, но для более точного анализа взаимосвязи вводится информационный коэффициент корреляции:

$$R(x, y) = \sqrt{1 - e^{-2I_y(x)}} , \tag{49}$$

где

$$R(x, y) = 0 , \text{ где: } x, y - \text{ независимые случайные величины.}$$

При нормальном распределении коэффициенты совпадают и тогда:

$$I_y [x] = -\frac{1}{2} \cdot \ln(1 - \rho^2) . \tag{50}$$

Выборочным аналогом R служит коэффициент $\hat{R} = \sqrt{1 - e^{-2\hat{I}_y(x)}}$, который находим через информационную статистику \hat{I} :

$$\hat{I} = \sum_{i=1}^{\rho} \sum_{j=1}^t \frac{n_{ij}}{n} \log_2 \cdot \frac{n \cdot n_{ij}}{n_{i_0} \cdot n_j} , \tag{51}$$

где

n – число наблюдений;

n_{ij} – число наблюдений в выборке.

Причем:

$$n_{i_0} = \sum_{i=1}^t n_{ij}; n_j = \sum_{i=1}^{\rho} n_{ij} . \tag{52}$$

В результате проведенного анализа можно сделать вывод о том, что распределение коэффициента корреляции сводится к распределению выборочной информации с учетом выбранной информационной среды принятия решений [8]. Методом дальнейшего подбора выбираются конфигурации безопасного маневрирования судна, в том числе безэкипажного [7], с учетом рисков ограниченной акватории рабочей зоны e-Navigation.

Литература

1. Александровский И.И. О возможности и целесообразности использования алгоритма нелинейной фильтрации для решения задач предупреждения столкновения судов. – М.: Материалы XV ВНТК. Секция радиосвязи и радионавигации, 1990. – С. 47-54.
2. Указ Президента РФ от 10.10.2019 г. № 490 «О

- развитии искусственного интеллекта в Российской Федерации» (вместе с национальной стратегией развития искусственного интеллекта на период до 2030 года).
3. Положенцев И.А. Двухступенчатая система предупреждения столкновений судов. – М.: Кибернетика и вычислительная техника, 1981. – №3. – С. 73-76.
4. Шеннон К. Работы по кибернетике. – М.: ИЛ, 1963. – 829 с.
5. Логиновский В.А. Применение преобразований для анализа и обработки навигационной информации: диссертация на соискание ученой степени д.т.н.– JL: 1991.
6. Hagen J.E. Implementing e-Navigation, 2017. – 203 p.
7. Кондратьев А.И., Худяков О.А., Попов А.Н. О необходимости внедрения беспилотных судов в торговый флот России [Текст]// Транспортное дело России. - 2016. - №6(127). – С. 138 – 140.
8. Milgram, P. A taxonomy of mixed reality visual

- displays / P. Milgram, F. Kishino // IEICE Trans. Information systems, vol. E77-D, No. 12, 1994. – P. 1321-1329.
9. Петросьян А.В., Хекерт Е.В. Улучшение безопасности мореплавания в районах действия систем управления движением судов // Вестник государственного морского университета им. адмирала Ф.Ф. Ушакова. – 2016. – № 2 (15). – С. 22-24.
 10. Кондратьев С.И., Карапузов А.И., Миронов А.В. Маневрирование крупнотоннажных судов и моделирование их движения учебное пособие. – Новороссийск: «Морская гос. акад. им. адм. Ф.Ф. Ушакова», 2007.

References

1. Aleksandrovskiy I.I. O vozmozhnosti i tselesoobraznosti ispol'zovaniya algoritma nelineynoy fil'tratsii dlya resheniya zadach preduprezhdeniya stolknoveniya sudov. – M.: Materialy KhV VNTK. Sektsiya radiosvyazi i radionavigatsii, 1990. – S. 47-54.
2. Ukaz Prezidenta RF ot 10.10.2019 g. «O razvitii iskusstvennogo intellekta v Rossiskoi Federatsii (vmese s natsionalnoi strategiei razvinia iskusstvennogo intellekta na period do 2030 goda).
3. Polozhentsev I.A. Dvukhstupenchataya sistema preduprezhdeniya stolknoveniy sudov. – M.: Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika, 1981. – №3. – S. 73-76.
4. Shannon K. Raboty po kibernetike. – M.: IL, 1963. – 829 s
5. Loginovskiy V.A. Primenenie preobrazovaniy dlya analiza i obrabotki navigatsionnoy informatsii. Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni d.t.n., L.: 1991.
6. Hagen J.E. Implementing e-Navigation, 2017. – 203 p.
7. Kondrat'ev A.I., Hudyakov O.A., Popov A.N. O neobходимости vnedreniya bespilotnykh sudov v torgovyy flot Rossii [Text] // Transportnoe delo Rossii. – 2016. – №6(127). – S. 138-140.
8. Milgram, P. A taxonomy of mixed reality visual displays / P. Milgram, F. Kishino // IEICE Trans. Information systems, vol. E77-D, No. 12, 1994. – P. 1321-1329.
9. Kondrat'ev S.I., Karapuzov A.I., Mironov A.V. Маневрирование крупнотоннажных судов и моделирование их движения. учебное пособие / Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Морская гос. акад. им. адм. Ф.Ф. Ушакова». Новороссийск, 2007.

УДК 656.073

DOI: 10.34046/aumsuomt93/6

МОДЕЛИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТРАМПОВОЙ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Я.Я. Эглит, доктор технических наук, профессор,
К.Я. Эглите, доктор экономических наук, профессор
М.А. Шаповалова, доцент кафедры УТС
Д.А. Глушко, лаборант кафедры УТС*

В статье представлен моделирующий алгоритм функционирования трамповой транспортно-технологической системы. Математическая модель предполагает выполнение параметрического описания всех видов обслуживания и работы трампового флот, включая формирование входящего потока заявок ожидание свободного места у причала, ожидание лоцманского обслуживания, перешвартовку, бункеровку, профилактический ремонт, материально-техническое обслуживание, оформление всех видов документации, выбор маршрута движения, переход от причала до приемного буя, формирование каравана при ледовой проводке, укрытие от шторма, фрахтовые операции, агентирование, экспедирование груза. Основными величинами, характеризующие состояние системы в рассматриваемый промежуток времени, являются время прибытия заявки на данный вид обслуживания, ее тип и возможный вариант обслуживания.

Ключевые слова: трамповые суда, транспортно-технологическая система, математическая модель, случайные величины, параметры системы.

The article presents a modeling algorithm for the operation of the Trump transport and technological system. The mathematical model involves the execution of a parametric description of all types of services and the operation of the Trump fleet, including the formation of an incoming stream of applications waiting for free space at the berth, waiting for the pilot's service, redrawing, bunkering, preventive repair, logistics maintenance, registration of all types of documentation, selection of the route of traffic, transition from the berth to the reception buoy, formation of a caravan during ice wiring, shelter from the storm, freight operations, and expedition. The main values characterizing the system state during the considered period of time are the time of arrival of the application for this type of service, its type and possible service option.

Key words: trump vessels, transport and technological system, mathematical model, random values, system parameters.