
УДК 629.5

В.В. Доронін

*Київська державна академія водного транспорту
імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного, Київ*

СИСТЕМНА ТЕХНОЛОГІЯ РОЗВ'ЯЗКУ ОПЕРАТИВНИХ ЗАДАЧ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ СИНТЕЗУ ЗАКОНІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВОДНОГО ТРАНСПОРТУ

Запропонована технологія розв'язку оперативних задач навігації для синтезу законів експлуатації водного транспорту. Проведені дослідження з застосуванням методу імітаційного модулювання дозволили зробити висновок про те, що масив навігаційних даних, які містяться в векторній електронній карті (ENC), дають змогу використовувати Inland ECDIS для розширення функціональних можливостей існуючих зразків AP, тим самим зменшуючи до мінімуму негативний вплив «людського фактора» в екстремальних умовах. Описаний підхід, реалізація якого дозволить розв'язати задачу автоматизації процесу судноводіння щодо точності утримання курсу судна по осі фарватеру за рахунок автоматизованого визначення і обліку допустимого відхилення судна від заданої траєкторії з дотриманням безпеки руху. Отримані показники ефективності запропонованого методу автоматизації показують значне збільшення точності утримання судна на осі фарватеру при збільшенні ймовірності безпечного плавання до 97%.

Ключові слова. *маршрут руху, водний транспорт, безпека руху, інформаційні технології, ймовірність безпечного плавання, inland ecdis, авторульовий.*

Вступ

Внутрішні водні шляхи (ВВШ) України представляють собою складні в навігаційному відношенні

райони з інтенсивним рухом, для яких характерні такі об'єкти, як мости, дамби, кілометрові покажчики, річкові інформаційні знаки та знаки регулювання руху, шлюзові камери і ворота, лінії електропередач і

трубопроводи, облицьовані ділянки берегового схилу і дна, плавучі казино, ресторани та інші об'єкти для відпочинку, що знаходяться на плаву. Це формує підвищені вимоги щодо точності і надійності річкового судноводіння [5]. Для безпечного судноплавства на внутрішніх водних шляхах повинні використовуватися високоточні засоби, що відповідають вимогам ІМО, стандартам СЕК ООН до руху у таких районах і дозволяють отримати інформацію про місце судна з погрішністю, що не перевищує 10 м з імовірністю безпечного плавання $P \geq 95\%$.

Сучасні водні транспортні засоби (ВТЗ) є складними інженерними спорудами, що втілили в собі новітні досягнення науково-технічного прогресу в сферах суднобудування та приладобудування, автоматизації процесів експлуатації водного транспорту.

Застосування сучасних інформаційних технологій (ІТ) в процесах експлуатації водного транспорту дозволило забезпечити судноводіння повною й достовірною інформацією про реальну обстановку навколо судна.

Електронні картографічні навігаційно-інформаційні системи з електронними картами на ВВШ (Inland ECDIS) при поєднанні з навігаційними датчиками дозволили з одного робочого місця керувати ресурсами ходового містка. Разом з тим слід зазначити, що практична спроба експлуатації засобів електронно-картографічної інтелектуалізації на ВВШ України виявила цілий ряд невирішених питань, пов'язаних з безпекою руху ВТЗ.

Устаткування суден засобами електронно-картографічної інтелектуалізації викликало істотні зміни в методах судноводіння, однак до якісного стрибка – до повної передачі управлінських функцій судноводіям – поки не призвело.

Мета роботи полягає у розробці ІТ для розв'язування задач автоматизації процесу судноводіння щодо точності утримання курсу судна по осі фарватеру. Дана мета може бути досягнута за умов використання засобів електронно-картографічної інтелектуалізації для розширення функціональних можливостей існуючих зразків авторульових (АР) з дотриманням безпеки руху ВТЗ.

Постановка задачі. Використання системної технології розв'язку оперативних задач використання засобів електронно-картографічної інтелектуалізації для синтезу законів експлуатації водного транспорту.

Проблемні ситуації час руху ВТЗ по осі фарватеру потребують усунення протиріччя та конфліктів, що притаманні традиційним технологіям використання АР і Inland ECDIS та впровадження новітніх методів ІТ. Даний напрям щодо взаємодії АР і Inland ECDIS є малодослідженим у порівнянні з іншими напрямками обробки даних засобами електронно-картографічної інтелектуалізації. У зв'язку з цим не розкриті в повному обсязі і науково не обґрунтовані

шляхи вирішення таких питань, як відсутність автоматизованих засобів надання даних для коригування параметрів авторульового на режим ситуативного маневрування судна.

Основний матеріал

Проведені дослідження з застосуванням методу імітаційного модулювання дозволили зробити висновок про те, що масив навігаційних даних, які містяться в векторній електронній карті (ENC), дають змогу використовувати Inland ECDIS для розширення функціональних можливостей існуючих зразків АР, тим самим зменшуючи до мінімуму негативний вплив «людського фактора» в екстремальних умовах.

Вводячи в АР елемент допустимого бокового відхилення ($Y_{\text{доп}}$) від заданої траєкторії руху судна (осі суднового ходу, фарватера, рекомендованого курсу та інш.) можна значно збільшити ступінь автоматизації процесу судноводіння. При цьому

$$Y_{\text{доп}} = f(\Delta K; P_{(\varphi, \lambda)}; P_{\text{відх}}; x_{\text{тп}}; M_{\text{доп}}; S; B_{\text{СХ}}; V_M; L_M / B_M / H_M; b; \omega; L_n; L_k; M_{\text{карт}}),$$

де ΔK – зміна курсу судна в бік заданої траєкторії руху;

$P_{(\varphi, \lambda)}$ – координати точок заданої траєкторії руху судна;

$P_{\text{відх}}$ – ймовірність невиходу за кромки суднового ходу;

$x_{\text{тп}}$ – відстань до заданої шляхової точки;

$M_{\text{доп}}$ – допустима СКП місця судна;

S – сумарний знос судна;

$B_{\text{СХ}}$ – габаритна ширина суднового ходу;

V_M – швидкість судна;

$L_M / B_M / H_M$ – довжина, ширина, осадка судна;

Ω – кутова швидкість повороту судна;

L_n, L_k – відстань від носу і корми судна до кромки суднового ходу;

$M_{\text{карт}}$ – масштаб ENC.

При ухиленні судна від осі суднового ходу (рис. 1)

$$Y = Y_{\text{доп}} = M_{\text{доп}}, \quad B_{\text{СХ}} \sim L_M; B_M \text{ (для ВВШ)}. \quad (1)$$

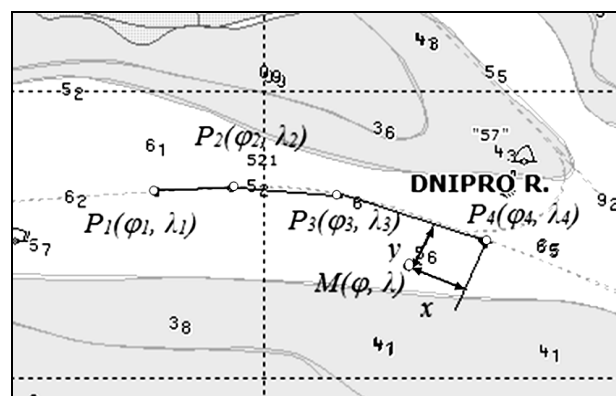


Рис. 1. Ілюстрація вводу шляхових точок при плаванні судна заданим маршрутом

При $V_{CX} \gg V_M$, використовуючи інтеграл ймовірностей (функція Лапласа) [9], отримаємо

$$P_{\text{відх}} = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^m \frac{V_{CX}/2 - V_M}{e^{-t^2}} dt,$$

$$m \approx M \Rightarrow M_{\text{доп}} = \frac{V_{CX}/2 - V_M}{X}, \quad (2)$$

де X – аргумент функції Лапласа за заданою $P_{\text{відх}}$.

Зміна допустимої похибки визначення місця судна M_0 залежно від ширини суднового ходу при $P_{\text{зад}}$ показано на рис. 2.

V_{CX}	$P_{\text{зад}}$				
	0,997	0,99	0,95	0,9	0,8
30	4,4	5,1	6,8	8,1	10,4
50	11,2	12,9	17,0	20,3	26,0
80	21,3	24,5	32,3	38,6	49,4
100	28,0	32,2	42,5	50,8	65,0
150	4,49	51,7	68,0	81,2	104,1

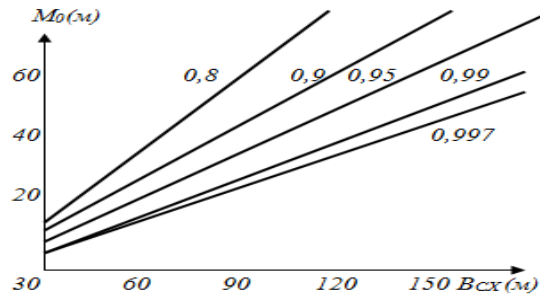


Рис. 2. Зміна допустимої похибки визначення місця судна M_0 залежно від ширини суднового ходу V_{CX} при $P_{\text{зад}}$

При сумарному зносі [10]:

$$S = \sqrt{L^2 \sin^2 c + V_M^2 \cos^2 c}, \quad c = \text{ПУ} - \text{ИК},$$

$$\Rightarrow M_{\text{доп}} = \frac{V_{CX}/2 - S}{X}. \quad (3)$$

При $V = 50 \div 100$ м, $P_{\text{відх}} = 0,95$

$$\Rightarrow M_{\text{доп}} = \frac{V_{CX} - S}{X}.$$

При $V = 20 \div 50$ м, $P_{\text{відх}} = 0,997$

$$\Rightarrow M_{\text{доп}} = \frac{V_{CX} - S}{X}.$$

При звальній течії на крутих поворотах

$$V = 20 \div 100 \text{ м}, \quad P_{\text{відх}} = 0,997 \Rightarrow$$

$$M_{\text{доп}} = \frac{V_{CX} - S - d}{X}, \quad \text{де } d = V_T \cdot t \cdot \sin \varphi.$$

Виходячи з (1) ÷ (3), розраховуємо $Y_{\text{доп}} = M_{\text{доп}}$.

При звивистому руслі ріки і звальній течії можуть виникнути ситуації, показані на рис. 3.

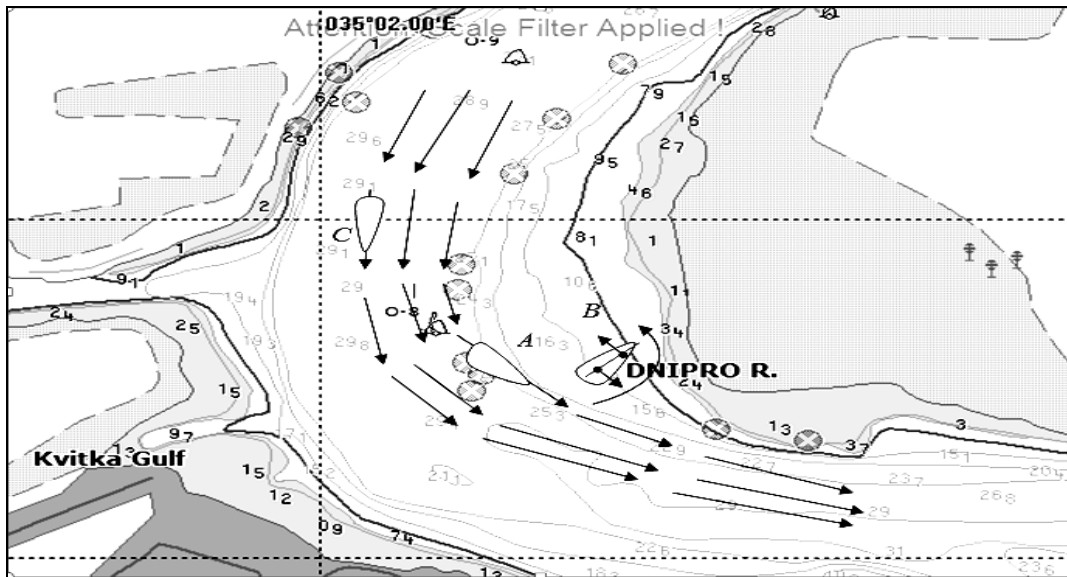


Рис. 3. Схема розвороту судна на вигинах річки зі звальною течією

Для безпечного судноводіння на даній ділянці повинна виконуватися умова $R_{ц} \approx R_{\text{min}}$, причому

$$Y_{\text{доп}} = f(\omega, K_{\text{СР}}, M_{\text{кр}}, M_{\text{н}}, M_{\text{к}}, L_{\text{н}}, L_{\text{к}}),$$

де $R_{ц}, R_{\text{min}}$ – радіуси циркуляції судна і закруглення суднового ходу; ω – кутова швидкість повороту судна; $K_{\text{СР}}$ – усереднене значення курсу; $M_{\text{кр}}$ – координати кромки суднового ходу, зняті з ENC; $M_{\text{н}}, M_{\text{к}}$ – координати носу і корми судна, отримані по

GPS на дві рознесені антени; $L_{\text{н}}, L_{\text{к}}$ – відстань носу і корми судна до кромки суднового ходу.

Такі ситуації можуть бути виключені шляхом застосування рознесеної в ніс і корму антени DGPS і визначення $\omega, K_{\text{DGPS}}, L_{\text{н}}, L_{\text{к}}$.

Принцип визначення ω і K_{DGPS} при використанні рознесених в ніс і корму антен DGPS показано на рис. 4.

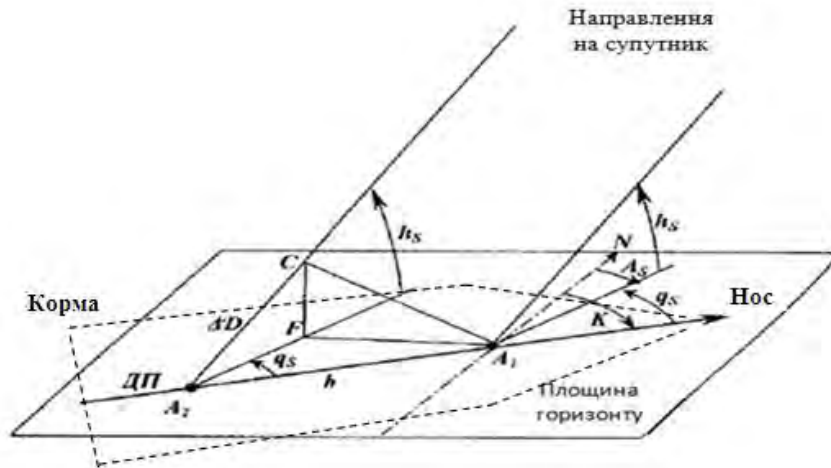


Рис. 4. Принцип визначення ω і K_{DGPS} при використанні рознесених в ніс і в корму антен DGPS

$\Delta D = D_{A1} - D_{A2}$; $\Delta D = f(\Delta\Phi) = f(\Delta\psi + n) = f(\Delta\psi)$ – з врахуванням багатозначності.

$$\Delta D = \lambda \cdot \Delta\Phi, \Rightarrow \Delta D = \lambda \cdot \Delta\psi.$$

$$\left. \begin{matrix} \Delta D \\ h_S \end{matrix} \right\} \rightarrow \begin{cases} A_2 F = \Delta D \cosh_S, \\ q_S = \arccos \frac{A_2 F}{b}, \rightarrow \omega = \frac{d\eta}{dt}, \\ K_{DGPS} = A_S - q_S. \end{cases} \quad (4)$$

де $\eta = K_{DGPS1} - K_{DGPS2}$.

Обчислення відстаней від носу і корми судна до кромок суднового ходу пояснюється наступним чином:

$$\begin{aligned} L_H &= M_{KP} - M_H = \\ &= \sqrt{(\Phi_{KP} - \Phi_H)^2 + \left[(\lambda_{KP} - \lambda_H) \cdot \cos \frac{\Phi_{KP} + \Phi_H}{2} \right]^2} = (5) \\ &= \frac{\Phi_{KP} - \Phi_H}{\cos K_1}, \\ L_K &= M_{KP} - M_K = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{(\Phi_{KP} - \Phi_K)^2 + \left[(\lambda_{KP} - \lambda_K) \cdot \cos \frac{\Phi_{KP} + \Phi_K}{2} \right]^2} = \\ &= \frac{\Phi_{KP} - \Phi_K}{\cos K_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

де K_1, K_2 – локсодромічне напрямлення.

Таким чином, можна забезпечити автоматичний розрахунок

$$Y_{доп} = f(\omega, K_{CP}, M_{KP}, M_H, M_K, L_H, L_K)$$

з використанням рознесених антен DGPS і введення в АР необхідних сигналів управління для забезпечення безпеки плавання судна по складних у навігаційному відношенні ділянках ріки в автоматичному режимі. Нижче описаний підхід, реалізація якого дозволить розширити функціональні можливості АР за рахунок автоматизованого визначення і обліку допустимого відхилення судна від заданої траєкторії, збільшити ступінь автоматизації процесу судноводіння.

На рис. 5 запропонована структурна схема взаємодії АР з Inland ECDIS.

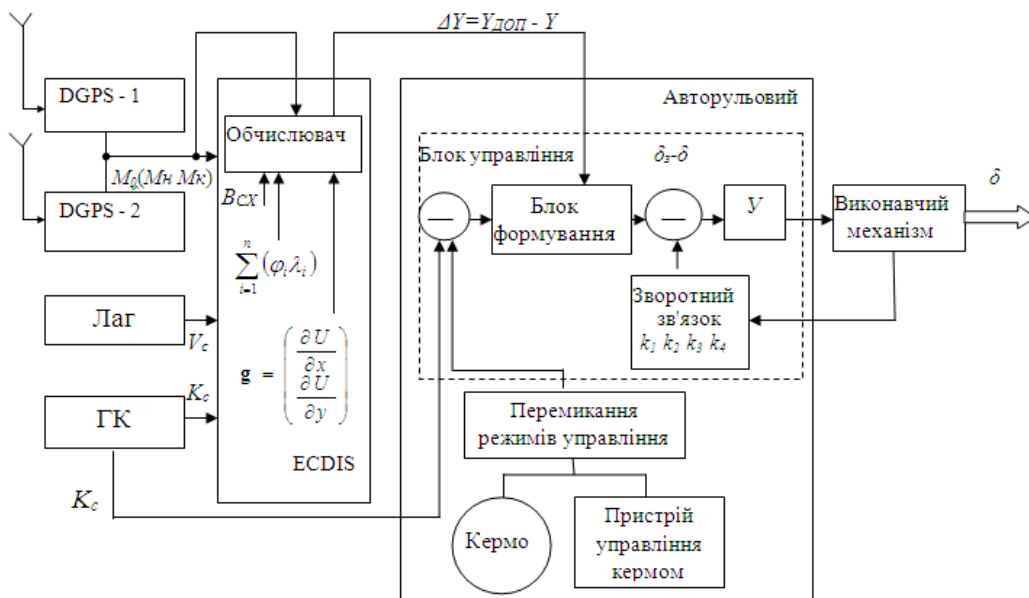


Рис. 5. Структурна схема взаємодії АР з ECDIS

АР містить блок управління для формування закону управління судном, підсилювач, виконавчий механізм, датчик зворотного зв'язку, адаптивний обчислювач.

Обчислювач і виконавчий механізм охоплені внутрішнім негативним зворотним зв'язком та утворюють слідкуючу систему управління кермом відповідно до заданого значення δ_3 .

Формування δ_3 відбувається у блоку управління.

Основна регульована величина – Y (1). Y обчислюється за даними ENC, зчислення і по сигналах DGPS по двох рознесених антенах (4) ÷ (6).

Дані з ENC надходять у вигляді градієнта g , напрямком якого умовно приймається в бік збільшення навігаційної функції U (рис. 6).

$$g = \begin{pmatrix} \frac{\partial U}{\partial x} \\ \frac{\partial U}{\partial y} \end{pmatrix}, \Rightarrow g = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial y}\right)^2} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2},$$

де g_x, g_y – проекції вектора g на координатні осі,

$\tau = \arctg(g_y/g_x)$ – напрямком вектора g .

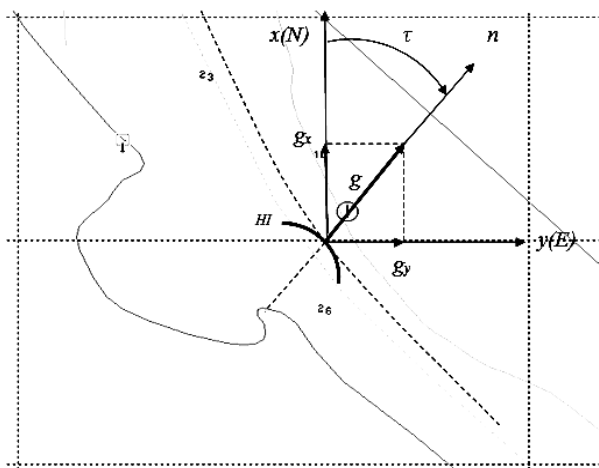


Рис. 6. Градієнт g навігаційної функції U

Заданий маршрут вводиться в Inland ECDIS, а потім в АР у вигляді

$$\sum_{i=1}^n (\varphi_i \lambda_i),$$

де n – кількість прямолінійних відрізків траєкторії судна.

АР виробляє значення бокового відхилення і відстані x до наступної точки повороту (рис. 1).

Другою регульованою величиною АР є кутове відхилення від заданого курсу ΔK . Автоматичне управління судном здійснюється від ECDIS в АР. Задача управління судном вирішується на підставі такої інформації:

$$\text{при } Y = Y_{\text{доп}}, Y_{\text{доп}} = M_{\text{доп}} \rightarrow \Delta K; \\ \text{за умовчанням } \Delta K = 5^0.$$

Таким чином, у схему добавлений новий блок – адаптивний обчислювач.

Автоматичний розрахунок і введення величини $Y_{\text{доп}}$ у блок управління АР здійснюється за формулами (1) ÷ (6). Величина δ_3 розраховується зяк

$$\delta_3 = - \left(k_1 \psi + k_2 \omega + k_3 y + k_4 \int_0^T y dt \right).$$

Для випробувань обрані частина прямолінійної S_1 і криволінійної S_2 ділянки для судноплавства. У заданих контрольних точках здійснювалося примусове відхилення судна від курсу і обчислювалися елементи ухилень від осі суднового ходу $\Delta b_1, \Delta t_1$ при візуальному методі контролю і при застосуванні методу імітаційного модулювання,

Ефективність запропонованого методу автоматизації взаємодії з внутрішніми і зовнішніми засобами гарантування безпеки руху в зоні підвищеного ризику плавання відображена в табл. 1.

$$|\Delta b_1 \max| > |\Delta b_2 \max| \quad P_{\text{бп}} > P_{\text{бп}} \\ \Delta t_1 > \Delta t_2 \quad \sigma_c < \sigma_0,$$

де Δb_1 – ухилення від осі суднового ходу при візуальному методі контролю;

Δb_2 – ухилення від осі суднового ходу при застосуванні методу імітаційного модулювання;

Δt_1 – час ухилення від осі суднового ходу при візуальному методі контролю;

Δt_2 – час ухилення від осі суднового ходу при застосуванні методу імітаційного модулювання.

Таблиця 1

Показники ефективності запропонованого методу автоматизації взаємодії Inland ECDIS з АР

$ \Delta b_1 \max - \Delta b_2 \max $ $\Delta t_1 - \Delta t_2$ $P_{\text{бп}}, P_{\text{бп}}, \sigma_0, \sigma_c$	Отримані показники ефективності запропонованого методу автоматизації по ділянках S_1, S_2		
	S_1		S_2
	1	2	1
$ \Delta b_1 \max - \Delta b_2 \max $	20 м	25 м	15 м
$\Delta t_1 - \Delta t_2$	4 хвил	5 хвил	5 хвил
$P_{\text{бп}}$	0.95	0.95	0.95
$P_{\text{бп}}$	0.97	0.98	0.96
σ_0	4.5	4.5	4.5
σ_c	3.9	4.0	3.8

Висновки

1. Математична обробка масиву даних, які містяться в ENC, дозволяє використовувати Inland ECDIS для розширення функціональних можливостей існуючих зразків AP.

2. Із введенням в AP елемента допустимого бокового відхилення ($Y_{\text{доп}}$) від заданої траєкторії руху судна (осі суднового ходу, фарватера, рекомендованого курсу та ін.) значно збільшується ступінь автоматизації процесу руху ВТЗ.

3. Отримані показники ефективності запропонованого методу автоматизації показують значне збільшення точності утримання судна на осі фарватера при збільшенні ймовірності безпечного плавання $P_{\text{бп}} = 1 - \exp(-D/M)^2$ до 97%.

Список літератури

1. Вагуценко Л.Л. Судовые навигационно-информационные системы / Л.Л. Вагуценко. – Одесса: Феникс, 2004. – 302 с. УДК 656.61.052.011.56.
2. Вагуценко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении / Л.Л. Вагуценко. – Одесса: ОНМА, 2013. – 135 с.
3. Васьков А.С. Оценка точности судовождения и гарантированной ширины полосы проводки судна / А.С. Васьков // Отчет НГМА № ГР01930004058. – Новороссийск, 1994. – 65 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учебник для ВТУЗ / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

5. Доронин В.В. Курс лекций. Судовые навигационно-информационные компьютерные системы с электронными картами: учебное пособие; часть II / В.В. Доронин. – К.: КГАВТ, 2011. – 84 с.

6. Богомья В.І. Навігаційне забезпечення управління рухом суден: посібник для вищих морських навчальних закладів – 1-е вид. / В.І. Богомья, В.С. Давидов, В.В. Доронін, Д.П. Пашков, І.В. Тихонов. – К., 2012. – 338 с.

7. Доронін В.В. Радіонавігаційні прилади та системи: посібник для вищих морських навчальних закладів / В.В. Доронін. – К.: КДАВТ, 2007. – 472 с.

8. Баранов Г.Л. Алгебраїзація маршрутів руху транспортних засобів / Г.Л. Баранов, В.В. Доронін, В.Р. Косенко, Д.М. Прохоренко // Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті. – К.: Національний транспортний університет. – 2014. – Вип. 1. – С. 60-70.

9. Иванов Б.Е. Об особенностях решения навигационных задач при использовании распределения Лапласа / Б.Е. Иванов // Навигация и гидрография. – 2001. – № 12. – С. 67-69.

10. Иванов Б.Е. Влияние погрешностей положения кромок фарватера на вероятность навигационной безопасности плавания / Б.Е. Иванов // Навигация и гидрография. – 2001. – № 13. – С. 31-37.

Надійшла до редколегії 31.08.2015

Рецензенти: д-р техн. наук, проф. Г.Л. Баранов, Національний транспортний університет України, Київ.

СИСТЕМНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕШЕНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ЗАДАЧ НАВИГАЦИИ ДЛЯ СИНТЕЗА ЗАКОНОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДНОГО ТРАНСПОРТА

В.В. Доронин

Предложена технология развязывания оперативных задач навигации для синтеза законов эксплуатации водного транспорта. Проведенные исследования с применением метода имитационного модулирования позволили сделать вывод про то, что массив навигационных данных, которые содержатся в векторной электронной карте (ENC), дают возможность использовать Inland ECDIS для расширения функциональных возможностей существующих образцов AP, тем самым уменьшить до минимуму негативное влияние «человеческого фактора» в экстремальных условиях. Описанный подход, реализация которого позволит развязать задачу автоматизации процесса судовождения по точности удержания курса судна по оси фарватера за счет автоматизированного определения и учета допустимого отклонения судна от заданной траектории с соблюдением безопасности движения. Полученные показатели эффективности предложенного метода автоматизации показывают значительное увеличение точности удержания судна на оси фарватера при увеличении вероятности безопасного плавания до 97%.

Ключевые слова: маршрут движения, водный транспорт, безопасность движения, информационные технологии, вероятность безопасного плавания, inland ecdis, авторулевой.

SYSTEM TECHNOLOGY OF UNTIING OF OPERATIVE TASKS OF NAVIGATION FOR THE SYNTHESIS OF LAWS OF EXPLOITATION OF WATER-CARRIAGE

V.V. Doronin

Technology of untiing of operative tasks of navigation is offered for the synthesis of laws of exploitation of water-carriage. The conducted researches with the use of method of the imitation modulating allowed to draw a conclusion about that array of navigation data which contained in a vectorial electronic card (ENC), enable to utilize Inland ECDIS for expansion of functional possibilities of existent standards ARE, the same to decrease to to the minimum negative influence of «человеческого фактора» in extreme terms. Described approach realization of which will allow to untie the task of automation of process of navigator on exactness of withholding of course of ship on the ax of waterway due to the automated determination and account of possible rejection of ship from the set trajectory with the observance of safety of motion. The got indexes of efficiency of the offered method of automation show the considerable increase of exactness of withholding of ship on the ax of waterway at the increase of probability of the safe swimming to 97%.

Keywords: route of motion, water-carriage, safety of motion, information technologies, probability of the safe swimming, inland ecdis, gyropilot.