

УДК 629.05

## СПОСІБ ПРИСКОРЕННЯ ЦИРКУЛЯЦІЇ НАВІГАЦІЙНИХ ДАНИХ НА ЦИФРОВІЙ МОДЕЛІ КАРТИ

**Доронін В.В.**

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

**Алєйніков М.В.**

*ТОВ «Южное речное пароходство», г. Херсон*

*Стаття присвячена актуальній проблемі, що стосується точного теоретичного аналізу та критеріїв щодо динаміки відображення на електронній карті наближення до лімітуючих обставин за критеріями безпеки руху водного транспорту.*

*Проведений аналіз проблеми відсутності комплексної автоматизації розв'язування найбільш важливих навігаційних завдань показав, що даний напрям є малодослідженим у порівнянні з іншими напрямками обробки картографічної інформації. Запропоновано спосіб прискорення циркуляції навігаційних даних на цифровій моделі карти, який включає математичне розв'язування задачі автоматичного отримання даних до лімітуючих обмежень навігації, складання алгоритму і розробку схеми вимірювання швидкості зміни навігаційної функції способом синхронного детектування.*

*Отримані показники ефективності запропонованого методу автоматизації показують збільшення ймовірності безпечного плавання до 97 %.*

**Ключові слова:** безпека судноплавства, інформаційні технології, електронна карта, градієнт функції, матриця параметрів, Inland ECDIS.

**Вступ.** Сучасний етап розвитку інтелектуальних технічних засобів характеризується розвитком морської електронної картографії, створенням суднових автоматизованих систем і приладів, які дозволяють відображати на електронному екрані місце судна і навігаційно-гідрографічну інформацію. Мета створення цих систем – докорінно покращити організацію роботи судноводіїв, підвищити її ефективність та знизити аварійність на водному транспорті.

Внутрішні водні шляхи (ВВШ) України це складні в навігаційному відношенні райони, для яких характерні такі об'єкти, як мости, дамби, кілометрові покажчики, річкові інформаційні знаки, 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 [6]. Дії судноводія під час виконання рейсу судна з використанням традиційних методів роботи з паперовими навігаційними картами, посібниками та керівництвами для плавання роблять цей процес досить трудомістким.

Практична спроба експлуатації засобів електронно-картографічної інтелектуалізації на ВВШ України виявила цілий ряд невирішених питань, пов'язаних з відсутністю комплексної автоматизації розв'язування найбільш важливих навігаційних завдань, що в кінцевому результаті впливає на безпеку руху та ефективну експлуатацію водного транспорту. Даний напрям є малодослідженим у порівнянні з іншими напрямками обробки навігаційних даних цифрової моделі карти засобами електронно-картографічної інтелектуалізації. Не розкриті в повному обсязі і науково не обґрунтовані шляхи вирішення таких питань, як неможливість своєчасного, відповідно до швидкості судна, відображення наближення до лімітуючих обставин за критеріями безпеки руху. Це підтверджується багатьма публікаціями, кількість яких останнім часом знову зростає, так як, не дивлячись на складність та існуючі проблеми, стала очевидною користь, яку можна отримати шляхом автоматизації попереджуючого відображення безпечної області навігації до позиції судна.

**Мета роботи** полягає у розробці інформаційних технологій (IT) для розв'язування задач автоматизації процесу судноводіння щодо введення в Inland ECDIS адаптивного режиму попереджуючого відображення безпечної області навігації до позиції судна. Дана

мета може бути досягнута за умов здійснення математичної обробки масиву даних, які містяться в ENC.

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

Проблемні ситуації під час руху ВТЗ на ВВШ України потребують усунення протиріччя та конфліктів, що притаманні традиційним технологіям використання даних Inland ECDIS та впровадження новітніх методів ІТ.

**Основний матеріал.** Для обґрунтування введення в Inland ECDIS адаптивного режиму попереджувального відображення безпечної області навігації до позиції судна позначимо навігаційний параметр у вигляді:

$$U = f(\varphi, \lambda)$$

Введемо позначення:

$D$  – дистанція до лімітуючих обмежень руху,

$\Pi$  – напрямок на лімітуючі обмеження руху,

$\beta, \alpha$  – вертикальний і горизонтальний кут до лімітуючих обмежень (мости, ЛЕП).

Множина  $U$  утворює скалярне поле цих параметрів на ENC, і так як координати лімітуючих обмежень руху відомі, то множина значень  $U$  визначає навігаційну функцію, тобто залежність  $U$  від координат місця судна. У локальній системі координат векторної карти можна записати  $U = f(x, y)$ .

При  $U = U_0 = const \Rightarrow U_0 = f(\varphi, \lambda) = const$  – рівняння навігаційної ізолінії (HI).

Введемо характеристику навігаційної функції – *вектор-градієнт*  $g$ , який характеризує максимальну швидкість зміни навігаційної функції, тобто швидкість зміни  $U$ , в конкретній точці.

$U$  змінюється швидше у напрямку  $n$ , яке є перпендикулярним до дотичної HI в точці знаходження судна. Іншими словами, градієнт спрямований по нормалі  $n$  до HI. Напрямок градієнта  $g$  умовно приймається в бік збільшення  $U$ .

$$g = \left( \frac{dU}{dx}, \frac{dU}{dy} \right) = \sqrt{\left( \frac{dU}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dU}{dy} \right)^2} = \sqrt{g_x^2 + g_y^2}, \quad \tau = \arctg \left( \frac{g_y}{g_x} \right), \quad (1)$$

де  $g_x, g_y$  – проєкції  $g$  на координатні осі,  $\tau$  – напрямок  $g$ .

На рис. 1 представлена ілюстрація градієнта навігаційної функції  $U$ .

Для знаходження модуля вектора градієнта обчислимо похідну від  $U$  по нормалі  $n$

$$g = \frac{dU}{dn},$$

де  $g$  – модуль градієнта.

*Використання навігаційної функції відстані до лімітуючих обмежень навігації*  $D(x, y)$ . На рис. 2 представлена навігаційна функція  $D(x, y)$  у вигляді поля ізостадій.

$D$  – відстань до лімітованих обмежень навігації. З рис. 3  $\Rightarrow D = \sqrt{(x - x_A)^2 + (y - y_A)^2}$ .

Виходячи з (1) обчислений модуль і напрямок градієнта відстані  $g_D$  у місці знаходження судна матиме вигляд

$$\frac{dD}{dx} = \cos \Pi, \quad \frac{dD}{dy} = \sin \Pi, \quad g_D = 1, \quad \tau = \Pi \pm 180^\circ.$$

Модуль градієнта відстані безрозмірний і спрямований у напрямку на лімітуючі обмеження руху в бік збільшення дистанції  $D$ . Знак «+» при визначенні  $\tau_D$  приймається, якщо  $\Pi < 180^\circ$ ; а знак «-» – якщо  $\Pi > 180^\circ$ .

Переміщення у напрямку на лімітуючі обмеження руху судна, тобто по нормалі  $n$  до ізостадії на величину  $\Delta n$ , дорівнюватиме зміні відстані  $\Delta D$  (рис. 4).

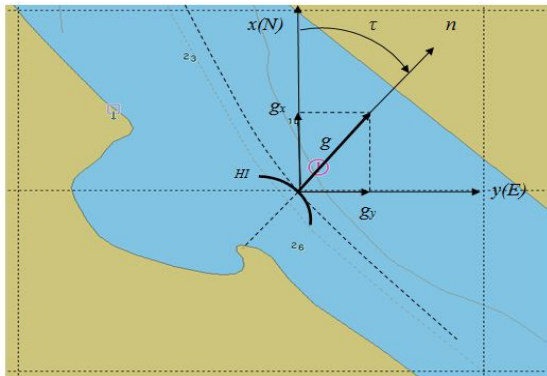


Рисунок 1 – Градієнт навігаційної функції  $U$



Рисунок 2 – Ізолінії навігаційної функції  $D(x, y)$

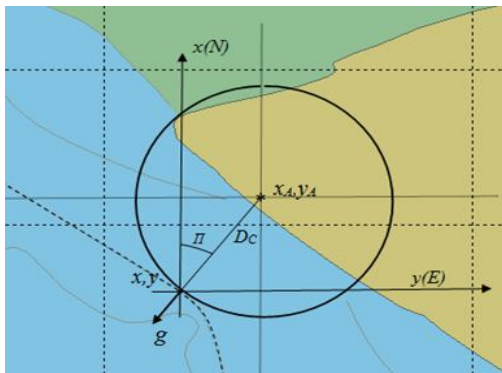


Рисунок 3 – Ізолінія і градієнт відстані

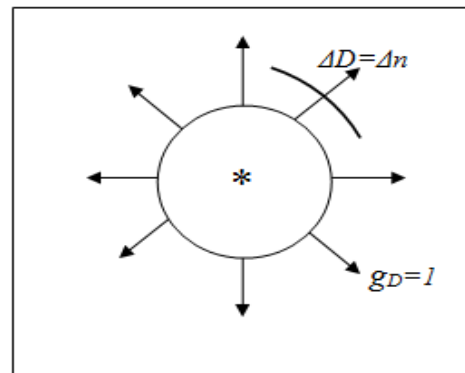


Рисунок 4 – Векторне поле  $g_D$  функції  $D(x, y)$

Використання навігаційної функції напрямку до лімітуючих обмежень навігації. На рис. 5, 6 представлені графічна функція і поля градієнтів напрямків до лімітуючих обмежень навігації у вигляді множини  $HI$ .

$$\operatorname{tg}\Pi = \frac{y_A - y}{x_A - x} \Rightarrow \Pi = \operatorname{arctg} \frac{y_A - y}{x_A - x}$$

$$\frac{d\Pi}{dx} = \left[ (x_A - x)^2 + (y_A - y)^2 \right]^{-1} (y_A - y)$$

$$\frac{d\Pi}{dy} = \left[ (x_A - x)^2 + (y_A - y)^2 \right]^{-1} (x_A - x)$$

$$g_{\Pi} = \frac{1}{D}, \quad \tau_{\Pi} = \Pi - 90^\circ. \quad (2)$$

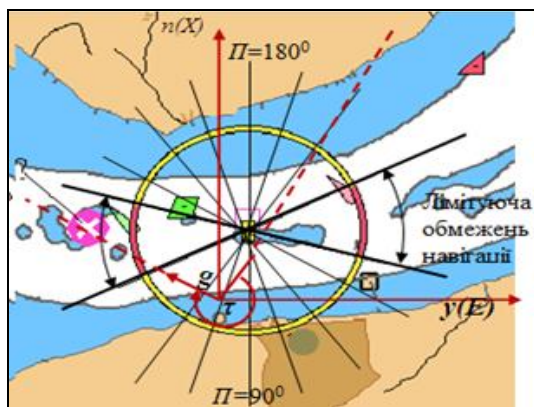


Рисунок 5 –  $HI$  і градієнт навігаційної функції напрямку  $\Pi$  до лімітуючих обмежень навігації

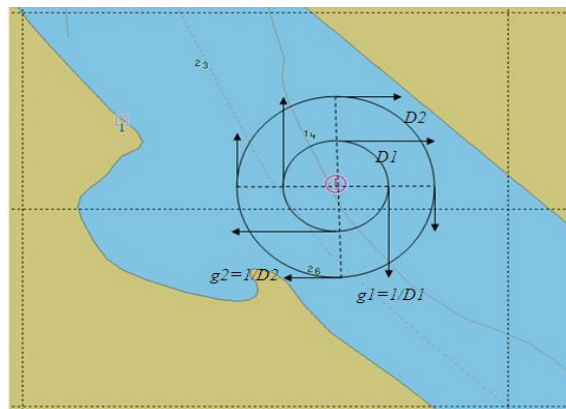


Рисунок 6 – Поля градієнтів напрямків до лімітуючого обмеження навігації

Модуль градієнта є величиною, оберненою до відстані лімітуючих обмежень навігації. Напрямок градієнта вибирається перпендикулярно до лінії напрямку, тобто по нормалі  $n$  у бік збільшення напрямку. При  $K = \tau \Rightarrow \Pi$  – збільшується.

Одиниці модуля градієнта (2)  $\Rightarrow$  рад/миля,  $g = \frac{d\Pi}{dn} = \frac{57,3^0}{D} \Rightarrow ^0/\text{миля}$ .

Використання навігаційної функції вертикального кута до лімітуючих обмежень навігації. Висота лімітуючих обмежень навігації на ENC відома, тому визначеному вертикальному куту  $\beta$  відповідає визначена відстань на ENC.

$HI$  є кут  $\beta$ ,  $HI$  – коло, тоді  $\beta = \text{arcctg} \left( \frac{D}{h} \right) \Rightarrow D = h \text{ctg} \beta$ .

$$\frac{d\beta}{dx} = \frac{1}{1 + \frac{D^2}{H^2}} = \frac{x_A - x}{\sqrt{(x_A - x)^2 + (y_A - y)^2}} = \frac{H(x_A - x)}{(H^2 + D^2) \cdot D} \quad (3)$$

$$\frac{d\beta}{dy} = \frac{H(y_A - y)}{(H^2 + D^2) \cdot D}$$

$$g = \sqrt{\frac{H^2 \left( (x_A - x)^2 + (y_A - y)^2 \right)}{(H^2 + D^2)^2 D^2}} = \frac{H}{H^2 + D^2} \quad (4)$$

$$\tau = \text{arcctg} \left( \frac{y_A - y}{x_A - x} \right) = \Pi_A$$

Аналіз формул (3), (4), дозволяє зробити висновок: модуль вектора градієнта вертикального кута збільшується при наближенні до лімітуючого обмеження навігації, а його напрямок співпадає з напрямком на нього.

На рис. 7 представлена навігаційна функція  $\beta$  у вигляді сітки ізоліній, проведених через рівні інтервали  $\Delta\beta$ . З наближенням до лімітуючого обмеження навігації збільшується модуль градієнта функції (при  $g \neq 1$ ).  $\beta_3 > \beta_2 > \beta_1$ ,  $\beta_1 = \text{const}$ ,  $\beta_2 = \text{const}$ ,  $\beta_3 = \text{const}$ .

Аналогічно обґрунтовуються використання навігаційної функції горизонтального кута до лімітуючих обмежень навігації.  $d$  – база між точками ENC.  $HI$  є ізогона з центром у точці  $O$ .

$$R = \frac{d}{2 \sin \alpha} = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \Rightarrow \alpha = \arcsin \left[ \frac{d}{2\sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2}} \right]$$

$$\alpha = \Pi_A - \Pi_B \Rightarrow \bar{g}_\alpha = \bar{g}_{\Pi_A} - \bar{g}_{\Pi_B}$$

$$\bar{g}_\alpha = \begin{pmatrix} \frac{d\alpha}{dx} \\ \frac{d\alpha}{dy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{d\Pi_A}{dx} \\ \frac{d\Pi_A}{dy} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{d\Pi_B}{dx} \\ \frac{d\Pi_B}{dy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{d\Pi_A}{dx} - \frac{d\Pi_B}{dx} \\ \frac{d\Pi_A}{dy} - \frac{d\Pi_B}{dy} \end{pmatrix}$$

$$\frac{d\alpha}{dx} = \frac{y_A - y}{D_A^2} - \frac{y_B - y}{D_B^2} = \frac{D_B \cos \Pi_A - D_A \cos \Pi_B}{D_A D_B}$$

$$\frac{d\alpha}{dy} = \frac{x_B - x}{D_B^2} - \frac{x_A - x}{D_A^2} = \frac{D_A \sin \Pi_B - D_B \sin \Pi_A}{D_A D_B}$$

$$g = \frac{d}{D_A D_B}, \quad \tau = \text{arctg} \left( \frac{D_A \sin \Pi_B - D_B \sin \Pi_A}{D_B \cos \Pi_A - D_A \cos \Pi_B} \right)$$

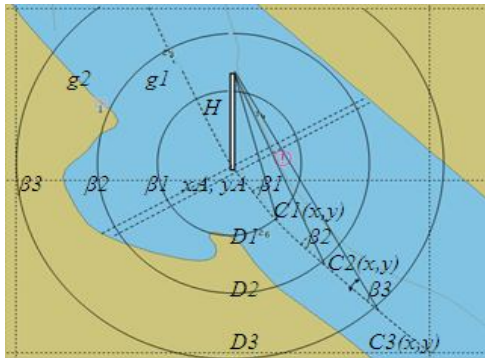


Рисунок 7 – Сітка ізоліній навігаційної функції  $\beta$

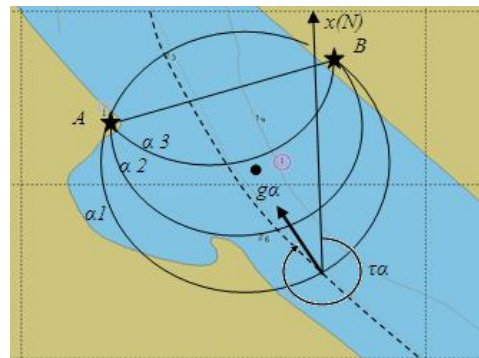


Рисунок 8 – Ізолінія навігаційної функції  $\alpha$  ( $\alpha = \text{const}$ )

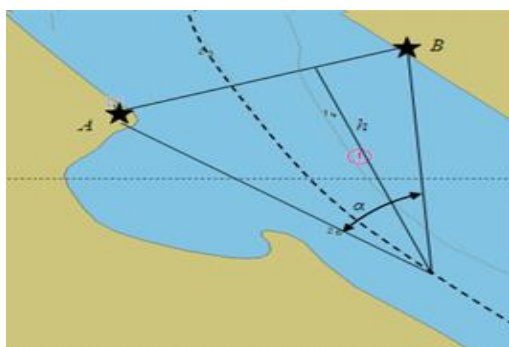


Рисунок 9 – До визначення  $g_\alpha$

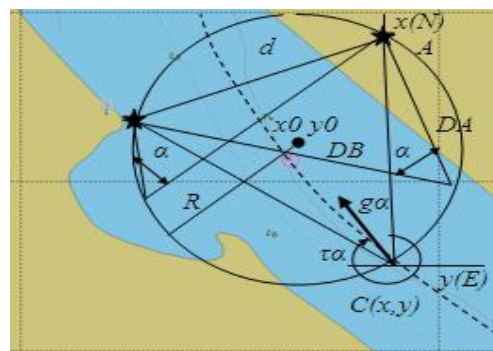


Рисунок 10 – Сітка PI функції  $\alpha$  ( $\alpha_1 = \text{const}$ ,  $\alpha_2 = \text{const}$ ,  $\alpha_3 = \text{const}$ )

На рис. 8–10 представлені *HI* функції горизонтального кута. При наближенні до точок ENC модуль градієнта збільшується. Для визначення градієнта  $g_\alpha$  та аналізу геометричних і точнісних характеристик можна застосувати спосіб, зображений на рис. 7,

$$g = \frac{\sin \alpha}{h} \text{ градієнт спрямований до центру ізогони у напрямку } \tau.$$

Для усунення недоліків аналітичних методів розрахунку застосуємо властивість лінеаризації навігаційних функцій у точці ENC розкладенням цієї функції у ряд Тейлора. Геометрично це заміна *HI* лінією положення (*ЛП*). *ЛП* не співпадає у точці 0  $\Rightarrow$  *ЛП* зміститься паралельно до самої себе в бік виміряного навігаційного параметра.

Елементарно малу різницю ( $U_o - U_c$ ) представимо у вигляді диференціала навігаційної функції  $U = f(x,y)$ :

$$dU = \frac{dU}{dx} dx + \frac{dU}{dy} dy \quad (5)$$

Диференціали  $dU, dx, dy$  замінимо кінцевими прирощеннями:

$$\Delta U = \frac{dU}{dx} \Delta x + \frac{dU}{dy} \Delta y \Rightarrow a_{11} \Delta x + a_{12} \Delta y = \Delta U \quad (6)$$

де  $\Delta U = U_o - U_c, \Delta x = x_o - x_c, \Delta y = y_o - y_c$ .

Для використання (6) у нормованому вигляді розділимо його праву і ліву частини на модуль градієнта навігаційної функції

$$\frac{dU}{dx(g)} \Delta x + \frac{dU}{dy(g)} \Delta y = \frac{\Delta U}{g} = \Delta n \quad (7)$$

де  $\Delta n$  – перенос *ЛП* по напрямку вектора-градієнта.

$$\cos \tau \Delta x + \sin \tau \Delta y = \Delta n \quad (8)$$

*Аналітичний розрахунок координат по двох ЛП.* Складемо систему двох рівнянь *ЛП* у матричному вигляді, де  $A$  – матриця коефіцієнтів *ЛП*,  $\Delta X, \Delta U$  – вектори невідомих і вільних членів.

$$\begin{aligned} a_{11} \Delta x + a_{12} \Delta y &= \Delta U_1 \\ a_{12} \Delta x + a_{22} \Delta y &= \Delta U_2 \end{aligned}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}, \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}, \quad \Delta U = \begin{pmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{pmatrix} \Rightarrow A \Delta X = \Delta U \quad (9)$$

Вирішення системи рівнянь (9):

$$\Delta X = A^{-1} \Delta U \Rightarrow X_o + \Delta X, \text{ де } X_o = \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \end{pmatrix}, \quad X_c = \begin{pmatrix} x_c \\ y_c \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Далі використовується ітераційна процедура (2-3 ітерації).

*Аналітичний розрахунок координат при надмірному числі рівноточного отримання навігаційних параметрів у векторній електронній карті.* При  $n = 3, k = 2 \Rightarrow$  надмірність  $r = n - k = 1$ . З формули (9) отримуються матриці:

$$A \Delta X = \Delta U \Rightarrow A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \\ a_{31} & a_{32} \end{pmatrix}, \quad \Delta X = \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}, \quad \Delta U = \begin{pmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_3 \end{pmatrix}.$$

При  $k < n$  така система – несовма. Ґрунтуючись на оцінці математичного сподівання і мінімальній дисперсії отримаємо матричне рівняння:

$$A\Delta X = \Delta U + V, \text{ де } V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Математична умова пошуку оптимального погодженого рішення визначається мінімальною довжиною вектора погрешностей  $V$

$$Q = |V|^2 = v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 = \min. \quad (12)$$

Вираз (12) визначає умову вирішення (11) методом найменших квадратів.

$$V = A\Delta X - \Delta U \Rightarrow Q = V^T V = (A\Delta X - \Delta U)^T (A\Delta X - \Delta U). \quad (13)$$

Візьмемо похідну від виразу (13) і прирівнявши її до нуля, знайдемо формулу для вирішення системи (12)

$$Q = \Delta X^T A^T \Delta X - \Delta U^T A \Delta X - \Delta X^T A^T \Delta U + \Delta U^T \Delta U$$

$$\frac{dQ}{d(\Delta X)} = 2A^T A \Delta X - \Delta U^T A - A^T \Delta U = 2A^T A \Delta X - 2A^T \Delta U = 0$$

$$A^T A \Delta X = A^T \Delta U, \quad \Delta \hat{X} = (A^T A)^{-1} A^T \Delta U \quad (14)$$

(14) – система нормальних рівнянь та її рішення.

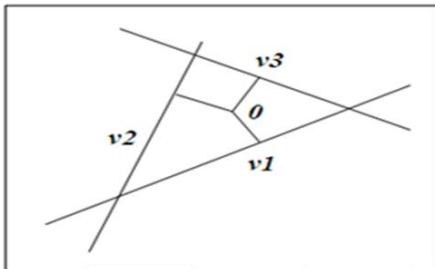


Рисунок 11 – До виведення формули (13)

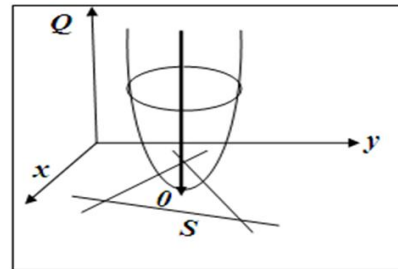


Рисунок 12 – Геометрична інтерпретація:  
 $o$  – точка, визначена за методом найменших квадратів;  $S$  – фігура похибок

Знак « $\hat{\phantom{x}}$ » означає, що рішення отримане із застосуванням критерія оптимальності  $Q$  (рис.11, 12). Далі застосуємо формулу (10) і виконаємо ітераційну процедуру. Точка, положення якої визначається вектором  $x_0$ , і буде являтися найбільш імовірною точкою.

При нерівноточному отриманні навігаційних параметрів у векторній електронній карті, що мають неоднакові  $t$ , найбільш імовірна точка, отримана за методом найменших квадратів, повинна бути ближче до тієї ЛП, яка точніша, а тому зрівнювання вимірів відбувається з врахуванням їх ваги. При отриманні ЛП формується вагова матриця.

Помножимо зліва праву і ліву частини (11) на матрицю  $W$

$$W = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 & 0 & 0 \\ 0 & w_2 & 0 \\ 0 & 0 & w_3 \end{pmatrix} \Rightarrow WA\Delta X = W\Delta U + WV,$$

тоді з (13) отримуємо

$$Q = (WV)^T (WV) = (WA\Delta X - W\Delta U)^T (WA\Delta X - W\Delta U) = \min$$

Для отримання системи нормальних рівнянь позначимо матрицю  $W^T W$  як вагову матрицю  $D^{-1}$

$$W^T W = D^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m_1^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m_2^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m_3^2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$A^T D^{-1} A \Delta X = A^T D^{-1} \Delta U, \quad \Delta \hat{X} = (A^T D^{-1} A)^{-1} A^T D^{-1} \Delta U \quad (16)$$

(16) – система нормальних рівнянь та її рішення. Елементи матриці (15) рівні і (16) → (14), (10) → найбільш імовірна точка по (16).

*Запропонований алгоритм* введення в Inland ECDIS адаптивного режиму попереджувального відображення безпечної області навігації показаний на рис. 13. Позначений навігаційний параметр у вигляді  $U = f(\varphi, \lambda)$  показує автоматизоване введення функцій в режимі виконавчої прокладки

$$U_D = f_1(\varphi, \lambda), U_\Pi = f_2(\varphi, \lambda), U_H = f_3(\varphi, \lambda), U_\Gamma = f_4(\varphi, \lambda), \quad (17)$$

де  $D$  – дистанція до лімітуючих обмежень руху;  $\Pi$  – напрямок на лімітуючі обмеження руху;  $H, \Gamma$  – вертикальні і горизонтальні лімітуючі обмеження (мости, ЛЕП).

Таким чином, множина  $U$  на ENC утворює векторну множину параметрів (17).

Далі по обчисленій похідній від  $U$  по нормалі  $n$  вводиться характеристика навігаційної функції – *вектор-градієнт*  $g$ , який характеризує максимальну швидкість зміни навігаційної функції, тобто швидкість зміни  $U$  в конкретній точці.

Модуль вектора градієнта  $g$ , представлений у вигляді двокомпонентного вектора,

Де  $g_x, g_y$  – проекції вектора  $g$  на координатній осі,  $\tau$  – напрямок вектора  $g$ .





У локальній системі координат ENC  $U = f(\varphi, \lambda) \Rightarrow U = f(x, y)$ .

Далі здійснюється автоматичне введення навігаційних функцій до лімітуючих обмежень навігації:  $D(x_A, y_A)$ ,  $\Pi(x_A, y_A)$ ,  $H(\beta, D, x_A, y_A)$ ,  $\alpha(D_A, D_B, x_A, y_A)$ , та визначаються  $g$  по кожній навігаційній функції

$$D(x_A, y_A) \Rightarrow (g_D, \tau_D), \Pi(x_A, y_A) \Rightarrow (g_\Pi, \tau_\Pi),$$

$$H(\beta, D, x_A, y_A) \Rightarrow (g_H, \tau_H), \alpha(D_A, D_B, x_A, y_A) \Rightarrow (g_\alpha, \tau_\alpha).$$

Для знаходження локального мінімуму функції по градієнту запропонований метод спряжених градієнтів, причому в  $R^n$  *min* знаходиться за  $n$  кроків (рис. 14).

$$\vec{S}_1, \dots, \vec{S}_n \in X \subset R^n, \dots, f(\vec{x}) \in C^2(X).$$

Вектори  $\vec{S}_1, \dots, \vec{S}_n$  – спряжені, якщо

$$\vec{S}_i^T H \vec{S}_j = 0, \quad i \neq j, \quad i, j = 1, \dots, n$$

$$\vec{S}_i^T H \vec{S}_j \geq 0 \quad i = 1, \dots, n,$$

де  $H$  – матриця Гессе  $f(\vec{x})$ .

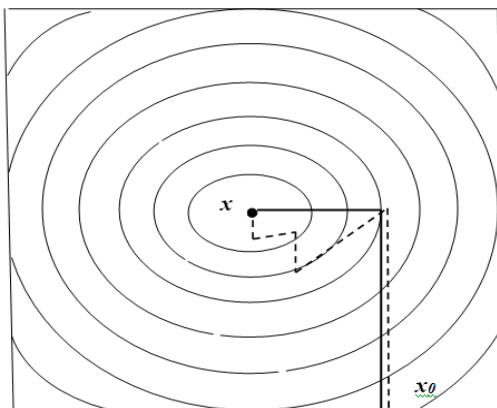


Рисунок 14 – Метод спуску (пунктирна ламана) і метод спряжених градієнтів (безперервна ламана) до точки екстремуму

$$\vec{S}_0 = -\nabla f(\vec{x}_0) \Rightarrow \vec{x}_0 + \lambda_1 \vec{S}_0 \tag{18}$$

Визначимо напрям за умови спряження з  $\vec{S}_0$

$$\vec{S}_1 = -\nabla f(\vec{x}_1) + \omega_1 \vec{S}_0, \quad \vec{S}_0^T H \vec{S}_1 = 0 \tag{19}$$

Розкладемо  $\nabla f(\vec{x})$  в оточенні  $\vec{x}_0$  і підставимо  $\vec{x} = \vec{x}_1$ :

$$\nabla f(\vec{x}_1) - \nabla f(\vec{x}_0) = H(\vec{x}_1 - \vec{x}_0) = \lambda_1 H \vec{S}_0 \tag{19}$$

Транспонуємо і домножуємо на  $H^{-1}$ :

$$(\nabla f(\vec{x}_1) - \nabla f(\vec{x}_0))^T H^{-1} = \lambda_1 \vec{S}_0^T H^T H^{-1}$$

Другі часткові похідні – неперервні.

$$H^T = H \Rightarrow \vec{S}_0^T = \frac{(\nabla f(\vec{x}_1) - \nabla f(\vec{x}_0))^T H^{-1}}{\lambda_1}$$

підставимо в (19)  $\Rightarrow$

$$\frac{(\nabla f(\bar{x}_1) - \nabla f(\bar{x}_0))^T H^{-1} H \bar{S}_1}{\lambda_1} = 0,$$

тоді з (18), (19) отримуємо:

$$\frac{(\nabla f(\bar{x}_1) - \nabla f(\bar{x}_0))^T H^{-1} H \bar{S}_1}{\lambda_1} = 0,$$

$$(\nabla f(\bar{x}_1) - \nabla f(\bar{x}_0))^T (-\nabla f(\bar{x}_1) - \omega_1 \nabla f(\bar{x}_0)) = 0 \quad (20)$$

Якщо  $\lambda = \arg \min_{\lambda} f(\bar{x}_0 + \lambda \bar{S}_0)$ , то градієнти в  $(\cdot) \bar{x}_1 = \bar{x}_0 + \lambda \bar{S}_0 \perp \bar{x}_0$ . Застосовуючи правила скалярного добутку векторів  $(\nabla f(\bar{x}_0), \nabla f(\bar{x}_1)) = 0$ .

$$(2.0) \Rightarrow \omega_1 = \frac{\|\nabla f(\bar{x}_1)\|^2}{\|\nabla f(\bar{x}_0)\|^2} - \text{формула для обчислення } \omega.$$

Для  $k$ -ої ітерації маємо  $\bar{S}_0, \dots, \bar{S}_{k-1}$ , тоді наступний напрям:

$$\bar{S}_k = -\nabla f(\bar{x}_k) - \|\nabla f(\bar{x}_k)\|^2 \cdot \left( \frac{\nabla f(\bar{x}_{k-1})}{\|\nabla f(\bar{x}_{k-1})\|^2} + \dots + \frac{\nabla f(\bar{x}_0)}{\|\nabla f(\bar{x}_0)\|^2} \right),$$

або

$$\bar{S}_k = -\nabla f(\bar{x}_k) + \omega_k \bar{S}_{k-1}, \quad \omega_i = \frac{\|\nabla f(\bar{x}_i)\|^2}{\|\nabla f(\bar{x}_{i-1})\|^2},$$

де  $\omega_k$  розраховується на  $k$ -й ітерації.

Для визначення  $g$  запропонований спосіб синхронного детектування (рис. 15).

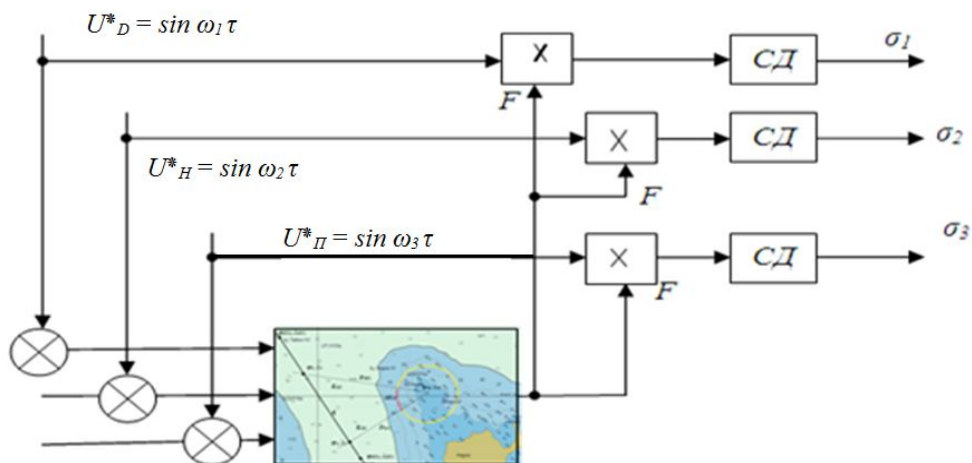


Рисунок 15 – Схема вимірювання  $g$  способом синхронного детектування:  
СД – синхронний детектор

До регулюючих впливів  $F$ , що повільно змінюються, примусово додаються спеціально створені пошукові періодичні височастотні впливи:

$$U_D^* \cdot \sin \omega_1 \tau; \quad U_H^* \cdot \sin \omega_2 \tau; \quad U_{\Pi}^* \sin \omega_3 \tau; \quad U_{\alpha}^* \sin \omega_4 \tau.$$

Пошукові частоти  $\omega_n$  обираються за числом аргументів, причому ні одна з цих частот не дорівнює сумі або різниці будь-якої пари інших частот. Цій вимозі відповідає вибір частот за законом непарних чисел  $\omega_q = (2m+1)\omega_0$ , де  $m = 1, 2, \dots, n$ .

Для усереднення змінних величин обирається інтервал часу, достатньо великий порівняно з самою низькою, як пошуковою, так і різницевою частотами. Квазістаціонарний режим дозволяє вважати регулюючі впливи  $F$  постійними в межах циклу пошуку.

Функція  $\Delta U$  з достатньою точністю, як це вказано у (5) – (8), розкладається у ряд Тейлора з використанням членів розкладання, що містять частинні похідні, включаючи другий порядок. Значення частинних похідних  $F$  для  $U_D, U_P, U_H, U_T$  показані на рис. 15.

Модульовані функції  $U_D, U_P, U_H, U_T$  надходять одночасно у паралельно підключені синхронні детектори  $СД$  по числу аргументів  $g$ . До кожного детектора синхронно з функцією якості подаються опорні коливання однієї з пошукових частот  $\omega$ . На виході кожного детектора отримується усереднений добуток модульованої функції та опорного коливання:

$$\sigma_g = \overline{F_i \sin \omega_i \tau_i}$$

В отриманому векторі  $\sigma_g$  усереднені синуси та їх добутки при непарному числі множників рівні нулю (через симетрію відносно осі абсцис).

Отже, при дотриманні умови  $q = l$  на виході усіх синхронних детекторів одночасно утворюються сигнали, пропорційні частинній похідній функції  $U$  для кожного відповідно регулюючого впливу.

#### **Висновки:**

1. Математична обробка масиву навігаційних даних, які містяться в цифровій моделі карти, дозволяє використовувати Inland ECDIS в адаптивному режимі попереджувального відображення безпечної області навігації до позиції судна

2. Із введенням характеристики навігаційної функції – вектора-градієнта  $g$ , який характеризує максимальну швидкість зміни навігаційної функції, тобто швидкість зміни  $U$  в конкретній точці цифрової моделі карти, значно збільшується ступінь автоматизації процесу безпечного руху ВТЗ.

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

#### **СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ**

1. Афанасьев В. В. Расчет координат места судна по избыточным навигационным измерениям : учебное пособие по математическим основам судовождения / В. В. Афанасьев, В. А. Логиновский – СПб. : ГМА имени адмирала Макарова, 2002.

2. Вагущенко Л. Л. Судовые навигационно-информационные системы / Л. Л. Вагущенко. – Одесса : Феникс, 2004. – 302 с.

3. Вагущенко Л. Л. Современные информационные технологии в судовождении. / Л. Л. Вагущенко. – Одесса : ОНМА, 2013. – 135 с.

4. Васьков А. С. Оценка точности судовождения и гарантированной ширины полосы проводки судна. / А. С. Васьков. – Новороссийск, 1994. – 65 с. – Отчет НГМА № ГР01930004058.

5. Вентцель Е. С. Теория вероятностей : учебник для ВТУЗ / Е. С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

6. Доронин В. В. Судовые навигационно-информационные компьютерные системы с электронными картами. Часть II. : курс лекций. / В. В. Доронин. – К. : КГАВТ, 2011. – 84 с.

7. Богомья В. І. Навігаційне забезпечення управління рухом суден : посібник для вищих морських навчальних закладів / [В. І. Богомья, В. С. Давидов, В. В. Доронін, Д. П. Пашков, І. В. Тихонов]. – К., 2012. – 338 с.
8. Доронін В. В. Радіонавігаційні прилади та системи : посібник для вищих морських навчальних закладів / В. В. Доронін. – К. : КДАВТ, 2007. – 472 с.
9. 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. – Випуск 1. – С. 60-70.
10. Кожухов В. П. Математические основы судовождения : учебник / В. П. Кожухов, А. М. Жухлин. – М. : Транспорт, 1993. – 123 с.
11. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1970. – С. 575-576.

## REFERENCES

1. Afanasjev V. V. Raschet koordinat mesta sudna po izbihtochnim navigacionnim izmereniyam : uchebnoe posobie po matematicheskim osnovam sudovozhdeniya / V. V. Afanasjev, V. A. Loginovskiy – SPb. : GMA imeni admirala Makarova, 2002.
2. Vaguthenko L. L. Sudovihe navigacionno-informacionnihe sistemih / L. L. Vaguthenko. – Odessa : Feniks, 2004. – 302 s.
3. Vaguthenko L. L. Sovremennihe informacionnihe tekhnologii v sudovozhdenii. / L. L. Vaguthenko. – Odessa : ONMA, 2013. – 135 s.
4. Vasjkov A. S. Ocenka tochnosti sudovozhdeniya i garantirovannoy shirinih polosih provodki sudna. / A. S. Vasjkov. – Novorossiysk, 1994. – 65 s. – Otchet NGMA № GR01930004058.
5. Ventcelj E. S. Teoriya veroyatnosteyj : uchebnik dlya VTUZ / E. S. Ventcelj. – M. : Nauka, 1969. – 576 s.
6. Doronin V. V. Sudovihe navigacionno-informacionnihe komp'yuternihe sistemih s ehlektronnimi kartami. Chastj II. : kurs lekciyj. / V. V. Doronin. – K. : KGAVT, 2011. – 84 s.
7. Bogomjya V. I. Navigacijne zabezpechennya upravlinnya rukhom suden : posibnik dlya vithikh morsjkih navchaljnikh zakladiv / [V. I. Bogomjya, V. S. Davidov, V. V. Doronin, D. P. Pashkov, I. V. Tikhonov]. – K., 2012. – 338 s.
8. Doronin V. V. Radionavigacijni priladi ta sistemi : posibnik dlya vithikh morsjkih navchaljnikh zakladiv / V. V. Doronin. – K. : KDAVT, 2007. – 472 s.
9. Baranov G. L. Algebraizaciya marshrutiv rukhu transportnikh zasobiv / [G. L. Baranov, V. V. Doronin, V. R. Kosenko, D. M. Prokhorenko] // Informacijni procesi, tekhnologii ta sistemi na transporti. – K. : Nacionalnij transportnij universitet, 2014. – Vipusk 1. – S. 60-70.
10. Kozhukhov V. P. Matematicheskie osnovih sudovozhdeniya : uchebnik / V. P. Kozhukhov, A. M. Zhukhlin. – M. : Transport, 1993. – 123 s.
11. Korn G. Spravochnik po matematike dlya nauchnikh rabotnikov i inzhenerov / G. Korn, T. Korn. – M. : Nauka, 1970. – S. 575-576.

### **Доронин В.В., Алейников М.В. СПОСОБ УСКОРЕНИЯ ЦИРКУЛЯЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ НА ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ КАРТЫ**

*Статья посвящена актуальной проблеме, которая касается точного теоретического анализа и критериев динамики отображения на электронной карте приближения к лимитирующим обстоятельствам по критериям безопасности движения водного транспорта.*

*Проведенный анализ проблемы отсутствия комплексной автоматизации решения наиболее важных навигационных заданий показал, что данное направление является малоисследованным по сравнению с другими направлениями обработки картографической информации. Предложен способ ускорения циркуляции навигационных данных на цифровой модели карты, который включает математическое решение задачи автоматического получения данных к лимитирующим*

*ограничениям навигации, составление алгоритма и разработку схемы измерения скорости изменения навигационной функции способом синхронного детектирования.*

*Полученные показатели эффективности предложенного метода автоматизации указывают на увеличение вероятности безопасного плавания до 97 %.*

**Ключевые слова:** *безопасность судоходства, информационные технологии, электронная карта, градиент функции, матрица параметров, Inland ECDIS.*

**Doronin V.V., Aleynikov M.V.** THE METHOD OF ACCELERATING THE CIRCULATION OF THE NAVIGATION DATA ON A DIGITAL MODEL OF THE CHART

*The article is devoted to the actual problem, with regard to the precise theoretical analysis of the dynamics of the criteria that is displayed on an electronic chart approach to limiting the circumstances of the safety criteria for water transport.*

*The analysis of the lack of comprehensive automation of unleashing the most important navigational tasks showed that this trend is a little studied compared to other areas of the processing of cartographic information. A method for accelerating the circulation of the navigation data on a digital model of the chart, which includes a mathematical solution to the problem of automatic data acquisition to restrictions limiting navigation, preparation and algorithm development schemes measuring the speed of change in the navigation function of the synchronous detection method.*

*These performance indicators show the proposed method of automation to increase the probability of safe navigation of up to 97 %.*

**Keywords:** *navigation safety, information technology, electronic chart, gradient of function, matrix parameters, Inland ECDIS.*

© Доронін В.В., Алєйніков М.В.

Статтю прийнято  
до редакції 17.10.15