

УДК 629.05

**МЕТОДИ РЕАЛІЗАЦІЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО ІНТЕЛЕКТУ
ПРИ ВИКОРИСТАННІ ДЕТАЛІЗОВАНОГО МАСИВУ ГЛИБИН
В РІЧКОВИХ ЕЛЕКТРОННО-КАРТОГРАФІЧНИХ СИСТЕМАХ**

В.В. Доронін, М.В. Алєйніков, В.М. Алєйніков

***Анотація.** Стаття присвячена підвищенню ефективності експлуатації водного транспорту за допомогою автоматизації відображення фактичних глибин на електронній карті шляхом реалізації методів обчислювального інтелекту. Представлений аналіз останніх досліджень та публікацій за темою. Запропоновано способи і сформульовано головні принципи підходу до інформаційного опису структури функціонування системи використання деталізованого масиву глибин при русі суден, методологію системної оптимізації і стратегії використання деталізованого масиву глибин, геометричне моделювання функціональних нелінійних задач навігації при змінах умов експлуатації, спосіб розв'язання задачі щодо зняття невизначеності ситуаційної динаміки використання деталізованого банку глибин у n -мірному просторі, спосіб інтелектуальної обробки потоку даних за символно-формалізованими перетвореннями Лапласа.*

***Ключові слова:** водний транспорт, безпека руху, електронна карта, водомірний пост, довкілля.*

**МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ИНТЕЛЛЕКТА
ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДЕТАЛИЗИРОВАННОГО МАССИВА ГЛУБИН
В РЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОННО-КАРТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

В.В. Доронин, М.В. Алєйников, В.М. Алєйников

***Аннотация.** Статья посвящена повышению эффективности эксплуатации водного транспорта с помощью автоматизации изображения фактических глубин на электронной карте путем реализации методов вычислительного интеллекта.*

Представлен анализ последних исследований и публикаций по теме. Предложены способы и сформулированы главные принципы подхода к информационному описанию структуры функционирования системы использования детализированного массива глубин при движении судов, методология системной оптимизации и стратегии использования детализированного массива глубин, геометрическое моделирование функциональных нелинейных задач навигации при изменении условий эксплуатации, способ решения задачи по снятию неопределенности ситуационной динамики использования детализированного банка глубин в n -мерном пространстве, способ интеллектуальной обработки потока данных с использованием символно-формализованных преобразований Лапласа.

© Доронін В.В., Алєйніков М.В., Алєйніков В.М., 2018

Ключевые слова: водный транспорт, безопасность движения, электронная карта, водомерный пост, охрана окружающей среды.

**METHODS OF IMPLEMENTATION OF THE COMPUTATIONAL INTELLIGENCE
WHEN USING THE DETAILED DEPTH MASK
IN RIVER ELECTRON-CARTOGRAPHIC SYSTEMS**

V.V. Doronin, M.V. Aleynikov, V.M. Aleynikov

The article is devoted to improving of operational efficiency of water transport automation, display of the actual depth of the electronic chart by implementing methods of computational intelligence. The analysis of recent research and publications is represented the topic. A mound them: methods and of main principles of approach to informative in description of the structure of the system, using of an array of detailed depth when driving vehicles, methodology and system optimization strategy, using of a detailed array of depths, geometric modeling functionality nonlinear problems navigating with changes in operating conditions, method of solving the problem of lifting uncertainties detailed situational dynamics using bank depths in n-dimensional space, intelligent processing method Flow data for character-formalized Laplace transform.

Keywords: water transport, traffic safety, electronic chart, water gauge post, environment.

Вступ. У XXI столітті річковий транспорт стає одним з найважливіших елементів транспортних перевезень, а його розвиток – потужним каталізатором економічного зростання й підвищення обороноздатності держави. Ефективним механізмом експлуатації водних транспортних засобів (ВТЗ) у сучасних умовах інтелектуалізації системи прийняття рішень є перехід на інструментальний метод навігації й подальше підвищення безпеки руху ВТЗ на внутрішніх водних шляхах (ВВШ) України. Багатокритеріальні вимоги до експлуатаційних режимів управління рухом ВТЗ, насамперед на стислих габаритних смугах ВВШ, породжують труднощі з реалізацією обчислювального інтелекту. За допомогою сучасних комп'ютерних, інформаційних та телекомунікаційних технологій він поки ще не здатний за критерієм обчислювальної складності зменшити показник аварійності суден.

Аналіз сучасного стану проблеми. Найважливішим елементом інструментального методу навігації на ВВШ України є система відображення фактичних глибин на електронній карті. Дослідження та розв'язання актуальної головної задачі полягає в диференційованому відображенні фактичних глибин на системній електронній карті (SENC) у річковій електронно-картографічній системі (Inland ECDIS), що вимагає розробки додаткових програмних, інформаційних та інструментальних засобів оперативного синтезу дієвих систем підтримки прийняття рішень для вахтових помічників капітанів.

Розв'язання проблеми дослідження щодо використання деталізованого масиву глибин, автоматизації його поновлення в Inland ECDIS сприятиме вирішенню прикладних задач для підвищення безпеки руху ВТЗ з урахуванням специфіки функціонування транспортної системи й потреб обороноздатності України. Зокрема, сьогодні головна відмінна особливість ВВШ України полягає в нестабільності глибин, русел річок і характеристик водних потоків. Так, наприклад, на річці Дніпро суттєві зміни суднового ходу можуть спостерігатися протягом однієї навігації. При цьому, подібним переформовуванням річкового русла властива випадковість і неоднорідність глибин [2].

Розробка і впровадження методів реалізації обчислювального інтелекту при використанні деталізованого масиву глибин в Inland ECDIS дозволить усунути відставання в розвитку сучасних транспортних технологій і прискорить процес інтеграції в Європейський союз. Введення інструментального методу навігації дозволить в особливий період оперативно закрити судноплавство по фарватеру й здійснювати провідку обраних суден.

Ідея дослідження обґрунтовується специфікою предметної області, що пов'язано з безпекою судноплавства на ВВШ України, двоїстістю природи використання деталізованого масиву глибин в річкових електронно-картографічних системах. З одного боку, це вимоги обороноздатності держави, безпеки судноплавства, пов'язані з достовірністю глибин і ізобат, що відображаються на SENC, тобто не мають суто економічного характеру. З іншого боку, економічна складова оцінюється системою критеріїв, пов'язаних з впровадженням зазначеної ідеї і конструктивного вирішення ряду додаткових задач: відмова від лоцманського принципу судноводіння; відмова від установки берегових і плавучих ЗНО, зменшення навантаження відображення SENC та інше. Вирішення зазначеної проблеми, по-перше, спростить завдання переведення експлуатації суднового ходу річки Дніпро в умовах особливого періоду. По-друге, ставить під сумнів необхідність установки берегових і плавучих засобів навігаційного обладнання (ЗНО), необхідність деталізації масиву глибин на SENC, оскільки: дані про глибини на ВВШ швидко застарівають, а для безпеки судноплавства набагато важливіше точне зазначення положення фарватеру.

Мета роботи. Метою досліджень є ефективна експлуатація водного транспорту за допомогою впровадження методів автоматизації отримання та відображення фактичних глибин на електронній карті з дотриманням вимог обороноздатності держави, безпеки руху та охорони навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень та публікацій за темою. Слід зазначити, що стаття, пов'язана з розв'язанням проблеми оновлення відображуваного масиву глибин на SENC, представляється вперше. Так сталося, що обрана проблема вивчена ще не повністю, деякі її аспекти досліджені поверхово і побіжно. У даному разі доречно вказати, що вивчення стану

даної проблеми почалося з найбільш ґрунтовних публікацій: монографії Паніна В.В. «Структурне моделювання та символічні перетворення для управління рухом транспортних засобів», Міністерство освіти і науки, 2014 [5] та дисертації Дороніна В.В. «Методи підвищення ефективності експлуатації водного транспорту засобами електронно-картографічної інтелектуалізації», Київ, КДАВТ, 2016, які є найбільш близькими до обраної проблеми.

У журналі «Річковий транспорт (XXI століття)», № 1, 2014 (Росія) в статті Каретникова В.В. «Перспективи розвитку електронних навігаційних карт внутрішніх водних шляхів Російської Федерації» [7] запропоновані рекомендації по впровадженню нових конструктивних підходів до створення та оновлення баз даних навігаційної інформації електронних навігаційних карт на ВВШ РФ. Було сформульовано ряд дуже цікавих науково обґрунтованих рекомендацій щодо створення баз даних ENC, впровадження яких на водному транспорті, безумовно, забезпечить підвищення безпеки судноплавства.

Вагомі наукові здобутки в розвитку інструментального методу навігації на річковому транспорті висвітлені в працях вітчизняних вчених: Вагущенка Л.Л., Баранова Г.Л., Паніна В.В., Беляєвського Л.С., а також закордонних вчених: Волкова А.Б., Гагарського Д.А., Каретникова В.В., Эрика Тадо Тедонзонга. Проблема щодо автоматизації оновлення відображуваного масиву глибин на ENC розглядалася тільки опосередковано у форматі пропозицій і гіпотез. З досвіду зарубіжних країн, наприклад, Австрії, відомо, що кодуються тільки ізобати. У США також кодуються тільки ізобати, позначки глибин відсутні. Примітно, що на ВВШ США плавучі ЗНО застосовуються лише в деяких місцях, а берегові ЗНО майже відсутні. На р. Міссісіпі здійснена повна відмова від лоцманського принципу судноводіння [7]. Такий підхід можна пояснити необхідністю мати в наявності ENC, що створені на достовірній базі даних, в тому числі на підставі фактичного оновленого масиву глибин.

Підхід, методи та особливості досліджень. У роботі використаний системний підхід до розробки і впровадження методів реалізації обчислювального інтелекту при використанні деталізованого масиву глибин на SENC, який полягає в дослідженні об'єкта як цілісної множини елементів у сукупності відношень і зв'язків між ними, тобто розгляд об'єкта як системи. Ефективність системного підходу для даної роботи, насамперед, залежить від характеру застосовуваних загальносистемних закономірностей, що встановлюють зв'язок між системними параметрами. Такі закономірності тісно пов'язані між собою взаємообумовленими етапами, на яких здійснювалися різні дослідницькі дії. Авторами використовувалися такі загальнонаукові методи, як: ідеалізація, формалізація; аналіз; синтез; індукція; дедукція; прийняття гіпотез, узагальнення, методи колективної генерації ідей, сценаріїв і експертні методи.

Викладення основного матеріалу. У результаті аналізу міжнародних та національних вимог до сучасних засобів навігаційного забезпечення [2], аналізу функціонування Центру підготовки фахівців морського та річкового транспорту встановлено, що функціональні можливості Inland ECDIS, що складають інтерактивне управління елементами мультимедійного простору інтелектуального терміналу, повинні бути розширені додатковими елементами навігаційних завдань.

Внутрішні та зовнішні зв'язки при експлуатації інтелектуальної підсистеми складної динамічної системи (СДС) Inland ECDIS можна формалізувати у вигляді єдиної структурної моделі

$$M(R) = (G, \Omega, R), \quad M(G) = (G_i, G_j), \quad M(\Omega) = (\Omega_i, \Omega_j), \quad R = (\sum p), \quad \sum p = \sum_{i=1}^n p_i + \sum_{j=1}^k p_j, \quad (1)$$

де G – множина елементів, що утворюють інтелектуальну підсистему СДС;

G_i – множина елементів основних навігаційних завдань;

G_j – множина елементів додаткових навігаційних завдань;

Ω – режими роботи підсистеми (навігаційний Ω_i , інформаційний Ω_j);

$R = (\sum p)$ – набір правил, які встановлюють взаємовідношення зв'язків p в інтелектуальній підсистемі СДС.

Елементи включення складаються з різних класів перетворювачів [5]. Задаючи параметри можна обчислювати відповідні значення в залежності від конкретного аналітичного закону $F(t, C)$, з використанням t – параметру, що виконує розгортку з необхідним заданим кроком, і C – набору заданих *const*. Одновходові та одновихідні функціональні перетворення можна виразити у вигляді

$$y = \Psi(x, C). \quad (2)$$

Функціональні перетворення можуть бути з диференціальними, інтегральними членами або гібридні. Основна формалізація, що ґрунтується на інтегрально-диференціальних рівняннях, забезпечує ефективне системно-аналогове моделювання підсистеми СДС. Алгебраїчні співвідношення реалізуються через системи лінійних або нелінійних алгебраїчних співвідношень. Комплексна модель вирішення додаткових експлуатаційних навігаційних завдань визначається графами зв'язку та матрицями по кожному елементу включення.

У роботі розглядається один з елементів включення – автоматизований показ глибин та ізобат для дійсного рівня води. Структура функціонування системи P використання деталізованого масиву глибин при русі суден по судновому ходу показана на рис. 1.

$$P = \sum_{i=1}^{n=13} \bar{P}_i. \quad (3)$$

З аналізу рис. 1 випливає, що між кожними двома ознаками підсистем існує функціональна залежність, при якій кожному значенню одного з них відповідає одне або кілька суворо визначених значень другого

$$\forall (P_i ; P_j), \quad (4)$$

де $j = \exists ! \frac{i \cdot (i+1)}{2}$.



Рис. 1. Підсистеми використання деталізованого масиву глибин P_i

Відповідно до інтегральної ознаки Коші інтеграл $\int_{i=1}^{i=13} \binom{i}{m} dm$ існує і ряд сходиться, де $\binom{i}{m}$ – число комбінацій m , вибраних з i елементів.

Слід зазначити, що між окремими ознаками

$$\forall (P_i ; P_j)^* \quad (5)$$

існує і кореляційна залежність, при якій зі зміною однієї ознаки P_i змінюється й інша P_j , і навпаки. Окремі ознаки (5) представлені у вигляді верхньої трикутної матриці M^* . $(3),(5) \Rightarrow M^* : n-5 \times n-5 \rightarrow m^*$.

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{cccccccc}
 (P_1; P_2) & (P_1; P_3) & (P_1; P_5) & (P_1; P_6) & (P_1; P_8) & (P_1; P_9) & (P_1; P_{10}) & (P_1; P_{11}) \\
 0 & (P_2; P_3) & (P_2; P_5) & (P_2; P_6) & (P_2; P_8) & (P_2; P_9) & (P_2; P_{10}) & (P_2; P_{11}) \\
 0 & 0 & (P_3; P_5) & (P_3; P_6) & (P_3; P_8) & (P_3; P_9) & (P_3; P_{10}) & (P_3; P_{11}) \\
 0 & 0 & 0 & (P_5; P_6) & (P_5; P_8) & (P_5; P_9) & (P_5; P_{10}) & (P_5; P_{11}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & (P_6; P_8) & (P_6; P_9) & (P_6; P_{10}) & (P_6; P_{11}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (P_8; P_9) & (P_8; P_{10}) & (P_8; P_{11}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (P_9; P_{10}) & (P_9; P_{11}) \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (P_{10}; P_{11})
 \end{array} \right) \quad (6)
 \end{array}$$

Для аналізу підсистем P_i (рис. 1) застосовані методи колективної генерації ідей, сценаріїв і експертні методи. Так, при проведенні тренажерної підготовки судноводіїв в Центрі підготовки фахівців морського та річкового транспорту за напрямом «Використання електронних та навігаційно-інформаційних систем на ВВШ України» судноводіям було поставлене експлуатаційне завдання:

визначити і ввести поправку до глибин, позначених на ENC і традиційних річкових навігаційних картах на паперовій основі, за даними РІС на заданий район плавання, дату і час.

В результаті: жоден судноводій не зміг визначити і ввести поправку до глибин за незалежних від нього причин. Після цього проведено анкетне опитування судноводіїв. Проведена оцінка ідей підтвердила актуальність напрямів досліджень. У зв'язку зі значною кількістю альтернатив проведена їх попередня і перспективна класифікація.

При застосуванні методу сценаріїв виявлена невизначеність єдиної висотної основи з даними РІС, невідповідність систем відліку рівнів води за даними річкових навігаційних карт на паперовій основі, ENC, РІС і водомірних постів (ВП), невизначеність зони дії основних (опорних) водомірних постів. Такі невизначеності вводять в оману судноводіїв через помилки у визначенні поправок до фактичних глибин, що, безумовно, знижує ймовірність безпечного плавання. Слід враховувати, що для автоматизованого показу фактичних глибин на SENC в Inland ECDIS різниця висот миттєвого рівня в 2-х крайніх точках зони дії водомірних постів не повинна перевищувати половини точності вимірювання і нанесення глибин на карту [8]. Усунення наявної невизначеності можна здійснити тільки умовною розбивкою на зони k_3 у межах дії водомірних постів.

$$k_3 = \frac{2 \cdot (h_2 - h_1)}{m_{z0}} \Rightarrow h_2 - h_1 = \frac{k_3 \cdot m_{z0}}{2}, \quad (7)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta z = \Delta z_f + \Delta z_{ИЗМ} + \Delta z_\alpha + \Delta z_M, \quad h_2 - h_1 = \frac{k_3 \cdot m_{z0}}{2}, \\ m_{z0} = \sqrt{m_{ИЗМ}^2 + m_{zM}^2}; \\ \Delta z_\alpha = z \cdot (\sec \alpha - 1); \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{dz}{ds} = g, \\ \Delta z_M = R \cdot \operatorname{tg} \alpha; \\ m_{zM} = \frac{1}{\sqrt{2}} M \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}, \quad \forall M = \overset{def}{\delta_K}, \end{array} \right. \quad (8)$$

де $h_2 - h_1$ – різниця перевищень миттєвого рівня між постами;
 m_{z0} – загальна погрішність глибини, показаної на карті;
 Δz – поправка до вимірної глибини;
 Δz_f – поправка глибин на рівень води;
 $\Delta z_{ИЗМ}$ – поправка засобу вимірювання (ехолота);
 Δz_α – поправка на уклон дна річки;
 Δz_M – поправка до глибини з урахуванням похибки визначення місця;
 m_{z0} – загальна погрішність глибини, показаної на карті;
 $m_{ИЗМ}$ – загальна погрішність вимірювання глибини;
 m_{zM} – загальна погрішність вимірювання глибини, пов'язаними з точністю визначення місця судна;
 z – вимірjana глибина;
 α – кут уклону річки;
 s – відстань між рівневими постами;
 g – градієнт функції;
 R – величина відхилення при визначенні місця;
 M – СКП визначення місця глибини;
 M_1 – СКП визначення місця глибини під час руху судна;
 M_2 – СКП нанесення глибин на карту;
 δ_K – точність карти.

На підставі структурної декомпозиції підсистеми P_5 (рис. 1) та її оцінки за результативністю та оперативністю також виявлені невизначеності (відсутня інформація значення нуля глибин в абсолютній системі відліку, не сформовані критерії судноплавства та інше).

Для генерування альтернатив скористаємося абстрактним рівнем опису окремих функцій підсистеми P_9 , використовуючи модель «чорного ящика» (рис. 2). Підсистема P_9 , яку символізує «чорний ящик», відособлена, тобто виділена з середовища, але не є повністю ізольованою, а пов'язана з зовнішнім середовищем через сукупність входів і виходів. Виходи моделі «чорного ящика» описують результати діяльності підсистеми, а входи – ресурси і обмеження.

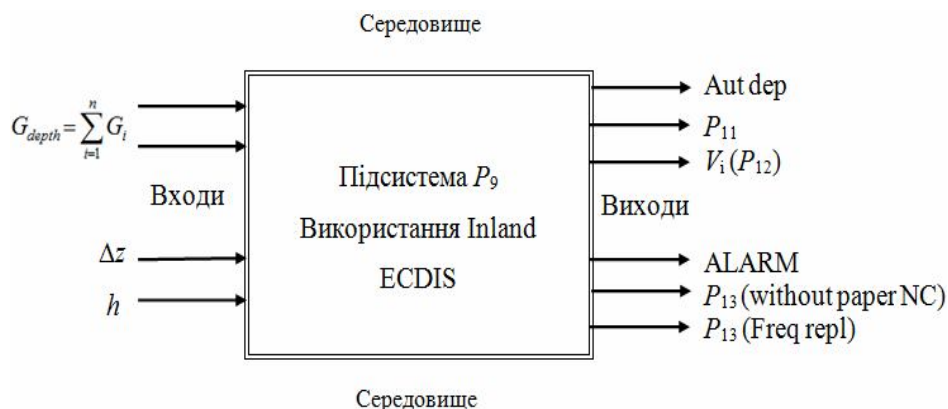


Рис. 2. Модель «чорного ящика» підсистеми P_9 :

G_{depth} – ресурси і обмеження використання деталізованого масиву глибин

Перейдемо до обґрунтування використаної методології системної оптимізації [1] і стратегії використання деталізованого масиву глибин при експлуатації Inland ECDIS. Розглянемо деталізований масив глибин у вигляді множини $\{R_{\Delta h}, R_S\}$, зображеної на рис. 3.

На рис. 3 вісь ординат – значення $\Delta h = h_2 - h_1$ (різниця миттєвих рівнів води в початковій і кінцевій точці зони дії водомірного поста), вісь абсцис – значення S (зона дії водомірного поста на судновому ході). Далі керуємося виразом (8).

Так, знизу множина $\{R_{\Delta h}, R_S\}$ обмежена віссю абсцис S , при цьому точкам $R_{\Delta h} = 0, R_S = 0$ відповідає очевидна ситуація $S = S_{\min} = 0 \Rightarrow \Delta h = 0$.

Права границя множини $\{R_{\Delta h}, R_S\}$ відповідає неймовірній, але можливій ситуації $R_S = S_{\max}$, при якій обмежена зона дії водомірного поста і яка визначає межу функціональної здійсненності банку даних глибин.

Зверху множина обмежена кривою $R_{\Delta h}(R_S)$, причому $\sup[R_{\Delta h}(R_S)] = R_{\Delta h\Pi}$, де $R_{\Delta h\Pi}$ – потенційне значення функціонального результату $\Delta h = h_2 - h_1$. Асимптотичне поведіння $R_{\Phi}(R_B)$ відображає відомий факт, що збільшення R_{S1} вимагає збільшення $R_{\Delta h}$.

Кожній точці множини $\{R_{\Delta h}, R_S\}$ у загальному випадку відповідає множина еквівалентних значень $R_{\Delta h}$ і R_S , які відрізняються своїми структурними й поведінковими особливостями.

Умовам $R_{\Delta h} = R_{\Delta h \text{ обр}} = \text{const}$ і $R_S = R_{S \text{ обр}} = \text{const}$ відповідає множина можливих варіантів, значення $R_{\Delta h}$ і R_S яких належать відповідно множинам $M_1 = \{R_{\Delta h}, R_S\} \cap R_{\Delta h \text{ обр}}$ і $M_2 = \{R_{\Delta h}, R_S\} \cap R_{S \text{ обр}}$.

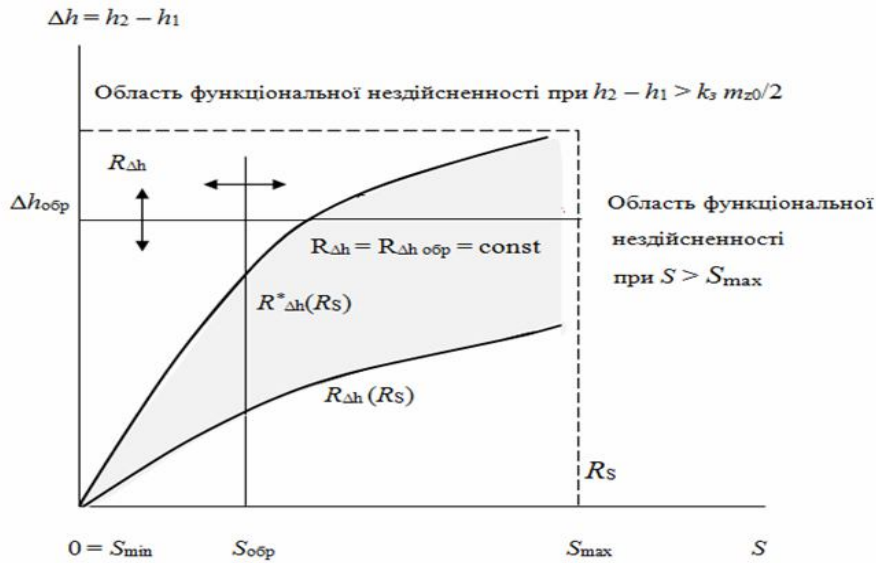


Рис. 3. Співвідношення функціональних показників $\Delta h = h_2 - h_1$ і S

Очевидно, що ці варіанти не еквівалентні. Кращі з цих варіантів характеризуються відповідно умовами $R_{\Delta h \text{ обр}}, R_S = \inf M_1; R_{S \text{ обр}}, R_{\Delta h} = \sup M_2$ і належать в обох випадках границі $\{R_{\Delta h}^*, R_S\}$ розглянутої множини $\{R_{\Delta h}, R_S\}$.

Зазначимо, що незалежно від того, чи шукається $\inf M_1$ при $\text{var} R_{\Delta h}$ або $\sup M_2$ при $\text{var} R_S$, результат буде мати вигляд сукупності кращих варіантів, що відповідають $R_{\Delta h}^*(R_S)$. Цей результат не зміниться, якщо шукати кращі варіанти не при $R_{\Delta h} = R_{\Delta h \text{ обр}} (R_S = R_{S \text{ обр}})$, а при $R_{\Delta h} < R_{\Delta h \text{ обр}} (R_S < R_{S \text{ обр}})$. Таким чином, при обмеженнях, як у вигляді рівностей, так і у вигляді нерівностей, кращі варіанти відповідають точкам $R_{\Delta h}^*(R_S)$ – границі області обмежень.

Якщо зафіксувати $R_{\Delta h}$ відповідно до деякого значення R_S , тоді значенню $R_S + \Delta R_S (\Delta R_S > 0)$ має відповідати $R_{\Delta h} + \Delta R_{\Delta h} (\Delta R_{\Delta h} > 0)$, тому що в іншому разі рівню $R_S + \Delta R_S$ буде відповідати безумовно гірший варіант, ніж для рівня R_S . При $S > S_{\text{max}}$ (збільшення зони дії ВП) починається область функціональної нездійсненності.

Залежність $R_{\Delta h}^*(R_S)$ у загальному випадку має конкретний вигляд і положення на площині визначається значеннями $K(U)$. Очевидно, чим значніший вплив середовища, що заважає, й жорсткіші обмеження, обумовлені вектором параметрів K , тим нижче розташована крива $R_{\Delta h}^*(R_S)$. Якщо зафіксувати параметри K й U на граничному рівні, то визначиться $R_{\Delta h}(R_S) = \text{igs } R_{\Delta h}^*(R_S)$.

Ця залежність може бути використана як нижня границя множини $\{R_{\Delta h}, R_S\}$ замість осі абсцис. Зараз безпосередньо перейдемо до суті основних етапів методології системної оптимізації.

1. На рівні елементів підсистем P_i (рис. 1) формується множина припустимих їх варіантів. Ці завдання вирішуються одним з таких способів:

а) проводиться оптимізація елементів підсистем P_i у рамках зазначеної на рис. 3 біфакторної $(R_{\Delta h}, R_S)$ постановки завдань оптимізації при застосуванні встановлених обмежень. При цьому, завдання оптимізації вирішується багаторазово для їх різних рівнів. Таким чином, різні рівні застосованих обмежень представляють собою в сукупності сітку в області можливого їх варіювання. Оскільки обмеження можуть бути й у вигляді рівностей, тому для завдань $\text{extr} R_{\Delta h} \forall R_S = R_{S_{\text{обр}}}$, $\text{min} R_S \forall R_{\Delta h} = R_{\Delta h_{\text{обр}}}$ застосовується використання обчислювального інтелекту, засноване на «нечіткій» логіці, тобто система наближених обчислень залежить лише від простоти відповідного рішення;

б) проводиться аналіз можливих принципів функціонування елементів підсистем P_i (рис. 1) з оцінкою показників $R_{\Delta h}, R_S$.

2. У рамках біфакторного завдання оптимізації вирішується завдання оптимального вибору структури функціонування параметрів підсистем P_i зі сформованою множиною припустимих її елементів. Результатом такої оптимізації є впорядкована (домінуюча) послідовність $\Delta z = f(h_2 - h_1)$, для якої характерне перевищення значень $R_{\Delta h}$ за рахунок росту R_S відносно попереднього члена домінуючої послідовності.

3. У рамках завдання оптимізації визначається рівень функціональної ефективності системи P . Розглядаються цільові функції математичних уявлень, залежності критеріїв оптимальності від потрібних змін підсистем P_i , а як обмеження – функціональна ефективність отримання фактичних глибин для забезпечення безпеки руху суден. Розглянемо рис. 4. Цільова функція

$$\Delta z_M = f(d, \alpha, \beta),$$

де d – відстань між точками A і B ($d = S / k_{3i}$);

α' – кут нахилу дна у напрямі $A'B'$;

α – максимальний кут нахилу дна;

β – кут між напрямом $A'B'$ і напрямом максимального нахилу.

$$\Delta z_M = B'B'' = d \text{tg } \alpha' = d \text{tg } \alpha \cos \beta, |d| = M_{\text{ОПР}}$$

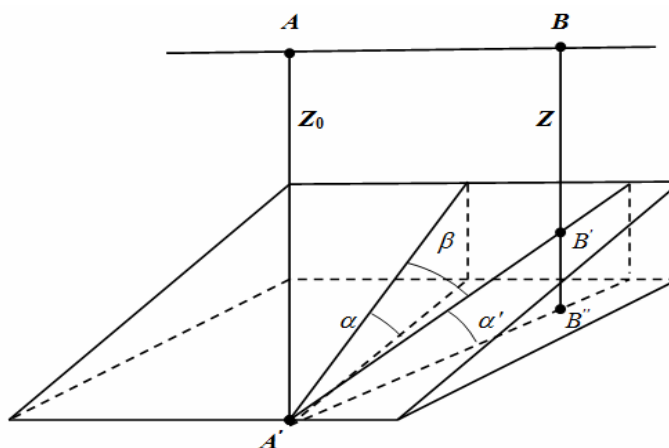


Рис. 4. Пояснення елементів цільової функції $\Delta z_M = f(d, \alpha, \beta)$

Розглянемо цільову функцію поправок до глибини з урахуванням похибки визначення місця судна [8]

$$\Delta z_M = f(d, \alpha, \beta) \Rightarrow \Delta z_M = d \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta, \quad \Delta z_M = d \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \cos \beta, \quad (9)$$

де α – відома величина, що розраховується з SENC;
 d і β – невідомі величини.

Вираз (9) – складна функція, задана неявно. Нехай в точці A виміряна глибина $AA' = z_0$. В результаті похибки у визначенні місця судна вона буде віднесена до точки B , де фактична глибина $BB' = z$. Таким чином, в результаті похибки визначення місця судна виникає похибка у визначенні глибини, d і β носять випадковий характер.

$$m_{z_M} = \frac{1}{\sqrt{2}} M \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad M = \sqrt{M_1^2 + M_2^2}, \quad m_{z_0} = \sqrt{m_z^2 + m_{z_M}^2},$$

де m_{z_0} – загальна похибка глибини, показаної на карті;

m_z – загальна похибка вимірювання глибини;

m_{z_M} – загальна похибка вимірювання глибини, пов'язана з точністю визначення місця судна.

Знайдемо екстремальні значення цільової функції (9), які визначаються вирішенням диференціального рівняння

$$(\Delta z_M)' = \operatorname{tg} \alpha \cdot (M_{\text{ОПР}} \cdot \cos \beta)' = \operatorname{tg} \alpha [M_{\text{ОПР}}' \cdot \cos \beta + M_{\text{ОПР}} \cdot (\cos \beta)'] .$$

$$\begin{cases} M'_{OPP} \cdot \beta \cdot \cos\beta = 0, \\ M_{OPP} \cdot (\cos\beta)' = 0. \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} M'_{OPP} = 0, & \beta = 90^\circ, \\ M_{OPP} \cdot \beta \cdot (-\sin\beta) = 0, & \beta = 0. \end{cases}$$

Вважаючи відхилення точок щодо лінії максимального нахилу дна рівноімовірними, отримаємо $\beta_{cp} = 45^\circ$.

$$(\Delta z_M)' = 0 \Rightarrow \begin{cases} M_{OPP \min} = 0, \\ M_{OPP \max} = 5M, \\ \beta_1 = 0^\circ, \quad \beta_2 = 90^\circ, \quad \beta_{CP} = 45^\circ, \end{cases} \quad \text{при } P = 95 \%.$$

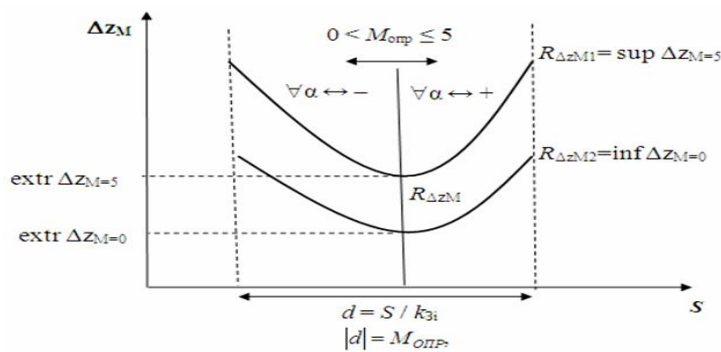


Рис. 5. Оптимізація параметрів множини $R_{\Delta z_M}$

На рис. 5 зображені залежності, що характеризують збільшення або зменшення значень множини $R_{\Delta z_M}$ залежно від рельєфу дна і точності визначення місця судна в межах $0 < M_{opp} \leq 5$ м;

$$R_{\Delta z M 2} = \inf \Delta z_{M=0} \leq R_{\Delta z M} \leq R_{\Delta z M 1} = \sup \Delta z_{M=5}.$$

Області множини

$$R^{(2)}_{\Delta z M} < R_{\Delta z M 2} = \inf \Delta z_{M=0} \text{ та } R^{(1)}_{\Delta z M} > R_{\Delta z M 1} = \sup \Delta z_{M=5}$$

є зонами функціональної нездійсненності.

4. Визначення доцільності використання потрібних змін та обмежень підсистем P_i здійснювалося з визначених на третьому етапі значень $\text{var } E_{\Delta z} \in R_{\Delta z}$, які зіставлялися з обмеженнями $\sup E_{\Delta z} \vee \inf E_{\Delta z}$.

Елементи $\text{var } E_{\Delta z}$ визначалися за результатами 2-го етапу (конкретна структура, стратегія використання й параметри змін до підсистем P_i), а згідно з результатами 1-го етапу – характеристики їх елементів.

5. На заключному етапі оптимізації проводився аналіз чутливості $\text{var}E_{\Delta z}$ до зміни параметрів елементів, каналів і підсистем P_i з метою визначення тих, удосконалення яких може призвести до істотного збільшення ефективності використання Inland ECDIS.

Особливостями викладеної методології є подолання багатокритеріальності оптимізаційних завдань, визначення їх обсягу і якості, обґрунтування змін до підсистем P_i , зниження рівня суб'єктивізму й підвищення частки формальних прийомів при постановці й вирішенні оптимізаційних завдань, подолання ряду невизначеностей, які неминучі при використанні принципів системного підходу тощо. Найбільш специфічний характер мали методи, використовувані на другому й третьому етапах.

Невизначеність об'єктів навігаційної небезпеки в районі суднового ходу пов'язана насамперед з рухомими границями [5], змінами рівня води в умовах критичних природних явищ. Бази даних Inland ECDIS відображають необхідні шари територіального застарілого деталізованого масиву глибин у просторі навігаційного обслуговування. Існуюча невизначеність геометричних характеристик обумовлює потребу у визначенні цільової безпечної області навігації у поточній ситуації.

Нехай S_0 – початкова форма геометричного об'єкта навігації (в зоні дії ВП) з системою базових координат на площині $X_0O_0Y_0$ (рис. 6).

Геометрична форма S_0 відрізняється від поверхневого картографічного шару SENC Inland ECDIS з реальним контуром берегів та глибин. Така розрахункова модель спрощено відображує особливості, які не враховуються в процесі розв'язку поточних задач навігації. S_0 – умовно замкнений багатокутник, що входить до робочої зони дії водомірного поста. Особлива властивість S_0 полягає у її ефективності для безпечного руху суден, оскільки дозволяє враховувати глибини та реальну осадку у поточній ситуації. S_0 може бути описана у пам'яті Inland ECDIS у вигляді

$$G_0 = \langle \{S_0\}, \{m_0, m_z\}, \{P_0\} \rangle, \quad (10)$$

де $\{S_0\}$ – ідентифікатор базової моделі з заданою геометричною конфігурацією багатокутника, що моделює реальний об'єкт;

$\{m_0, m_z\}$ – метричні характеристики базового геометричного об'єкта (координати вершин багатокутника, нуль глибин в абсолютній системі відліку);

$\{P_0\}$ – положення системи координат ENC (x_0, y_0) відносно системи координат SENC (x_{01}, y_{01}) при різних видах встановленої орієнтації.

Вираз (10) містить усі необхідні дані, які передбачають використання робочої базової моделі при розв'язанні цілого класу задач навігації, включаючи геометричне розташування деталізованого масиву глибин.

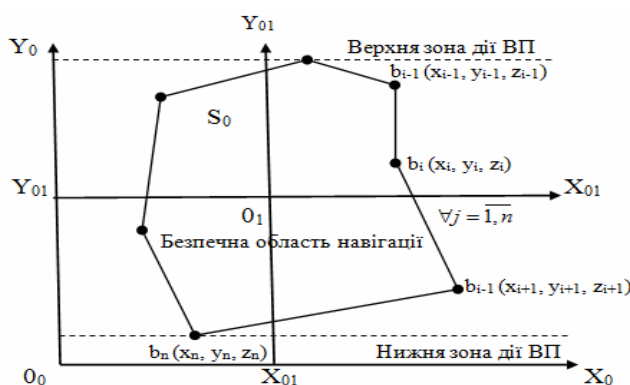


Рис. 6. Розрахункова S_0 модель n -кутника, що моделює реальний об'єкт судноводіння в межах дії водомірного поста

S_0 – верхня грань об'ємної тривимірної (3D) фігури. Координата Z_0 з координатами X_0, Y_0 характеризує базову глибину границь зони дії ВП. Вираз $\{m_0, m_Z\}$ складається через послідовність $(x_i, y_i, z_i), \forall i = \overline{1, n}$.

S_0 заповнюється значеннями реальних навігаційних глибин, що відповідають параметрам (10)

$$G_i = \langle \{S_j\}, \{m_j, m_{z_j}\}, \{P_j\} \rangle, \quad \forall j = \overline{1, m}. \quad (11)$$

Якщо вираз (11) відповідає фактичним глибинам з урахуванням автоматизованого введення поправок, тоді $G_0 - \sum_{i=1}^m G_j = G_g > 0$ буде на заданому часовому інтервалі T безпечною зоною плавання для суден з заданими габаритами та осадкою. $G_g(t)$ залежить від природних факторів для часу (t) відносно умовно експлуатаційного рівня t_0 .

Під дією природних факторів у зоні дії водомірного поста змінюється навігаційна область небезпеки $S_0 \rightarrow S_{\text{НОН}}(t)$, тоді можна отримати множину для безпечної області навігації

$$S_{\text{БОН}}(t) = S_0 - S_{\text{НОН}}(t), \quad S_0 = \text{const.}$$

Множини $S_{\text{НОН}}(t)$ і $S_{\text{БОН}}(t)$ умовно не перетинаються. Умови

$$\{S_0 = S_{\text{БОН}}(t) \cup S_{\text{НОН}}(t); S_{\text{БОН}}(t) \cap S_{\text{НОН}}(t) = 0; \forall i \in I, \forall j \in J\}.$$

Зона безпечного плавання в зоні дії ВП формується з урахуванням геометричних позицій усіх складових множин $S_{\text{НОН}}(t)$. Навігаційні глибини з урахуванням поправок відомі на конкретний час t_{i-1} , тоді

$$G_k(t_{i-k}) = \langle \{S_k(t_{i-1})\}, \{m_k(t_{i-1}), m_{z_k}(t_{i-1})\}, \{P_k(t_{i-1})\} \rangle.$$

Якщо в Inland ECDIS від датчиків інформації не надійшли нові дані, включаючи інформацію про нуль глибин, тоді $G_k(t_{i-1}) \equiv G_k(t_{i-1})$ незалежно від кроку $t_i - t_{i-1}$ спостереження довкілля $\forall G_k(t) \in S_0$.

Головними геометричними параметрами безпечної області навігації є значення метричних характеристик габаритної смуги руху [1]. Своєчасне відображення на SENC даних про стан глибин впливає на рівень безпеки судноводіння в стислих умовах реального плавання. Висока точність знання параметрів габаритної смуги руху необхідна особливо в судноплавних каналах, підходах до річкових портів та терміналів, мілководних районах з похилим рельєфом дна. Навігаційні глибини разом з прохідними осадками суден визначаються разом з оцінками точності довірчих інтервалів похибок вимірювання первинних параметрів, включаючи дані GPS. У загальному випадку судовий хід може мати декілька безпечних областей навігації.

Запропоноване геометричне моделювання функціональних нелінійних задач навігації внаслідок впливу факторів навколишнього середовища знімає невизначеність безпечних областей навігації. Існуюча картографічна система Inland ECDIS стає більш точною, достовірною та адекватною.

Зняття невизначеності ситуаційної динаміки використання деталізованого банку глибин у n -мірному просторі при русі судна описуємо у вигляді диференціально-інтегральних рівнянь.

Поведінка цілісної моделі S визначається як послідовність станів у неперервному інтервалі системного часу. Кожний з можливих експлуатаційних станів має поточну тривалість часу

$$t_{0i} \leq t_i \leq t_{0j} + T_i. \quad (12)$$

Зміна ситуацій $S_i \rightarrow S_j$ за стислий перехідний момент часу визначається як дискретний процес відповідно до логіко-динамічного алгоритму переходу згідно з фіксованими умовами поведінки. Використовуємо системи координат:

XOY – висотна система координат SENC в абсолютній системі висот;

X_1O_1Y – висотна система координат відносно нуля глибин ВП.
 $H_{0 \in y}(0) = 0$;

X_2O_2Y – висотна система координат відносно рівня води 1ВП.
 $h_{1 \in y}(0) = 0$;

$y = f(x)$ – функція ($n = 1$) зміни рівня води у системі координат X_2O_2Y ;

$z = f(x, y)$ – функція ($n = 2$) зміни рівня води у системі координат X_2O_2Y .

На всіх системах координат визначаємо верхній M (ВСП) і нижній m (НСР) судноплавні рівні.

Розв'язання задачі щодо зняття невизначеності ситуаційної динаміки використання деталізованого банку для автоматизації засобів електронно-картографічної навігації потребувало її декомпозиції на ряд окремих кроків і визначення відповідних математичних прийомів для їх вирішення.

Крок 1. Для знаходження поправок до вимірних глибин, що змінюються за часом t_i , спочатку доцільно використовувати рухоми відносно систему координат X_2O_2Y відносно рівня води 1ВП за умови:

– $h_1 \in y(0) = 0, y_{x2} \geq 0$, тобто $O_2 \in X_2O_2Y$ – миттєвий рівень води 1ВП;

– зміни по вісі абсцис $X_2 \equiv x(t) \leftrightarrow y(t)$ є функцією часу;

– положення точок на $y = f(x)$ залежать від різниці показів миттєвих рівнів води ВП і положення судна у зоні їх дії.

Функція $y = f(x) = F(x(t))$ є:

– складною функцією від t , причому за правилом диференціювання складної функції $(x(t))' = x'(t)'$;

– неявною функцією, що задана виразом $F(x, y) = 0$ при $F(x, f(x)) \equiv 0$.

Слід зазначити, що у системі координат X_2O_2Y x і y задані функціями від змінної t : $x = x(t)$, $y = y(t)$, тобто вираз $y = y(x)$ є параметрично заданною функцією в інтервалі $x \in (O_2; E)$. У цьому інтервалі рівняння $x = x(t)$ можна виразити у вигляді $t = t(x)$ і визначити функцію $y = y(t(x)) = y(x)$.

З огляду на вищезазначене вираз $y = f(x)$ можна представити у вигляді диференціального рівняння першого порядку $x:y' = y$. Обчислимо загальний інтеграл

$$y' = \frac{dy}{dx} \Rightarrow x \cdot \frac{dy}{dx} = y \Rightarrow \frac{dy}{y} = \frac{dx}{x} \Rightarrow \int \frac{dy}{y} = \int \frac{dx}{x} \Rightarrow \ln|y| = \ln|x| + C \Rightarrow \ln|y| = \ln|x| + \ln|C| .$$

Загальне вирішення функції представлено у явному вигляді

$$y = Cx. \tag{13}$$

$C = const$, за умови $|y_n| \leq \varepsilon / 2 \vee C \neq const$, за умови $|y_n| > \varepsilon / 2$

Надаючи C різні значення $\{C_0, C_1, C_2 \dots C_n\}$, можна отримати в SENC достатню послідовність окремих рішень диференціального рівняння для відображення деталізованого банку глибин при русі судна (рис.7).

Таку множину функцій можна реалізувати в Inland ECDIS за допомогою матричного обчислення.

У неперервному інтервалі системного часу (12) у межах дискретного процесу згідно з фіксованими умовами поведінки однієї змінної x отримуємо: (13) $\models C = const \Rightarrow z_i - z_j = const$ при обмеженнях по (8).

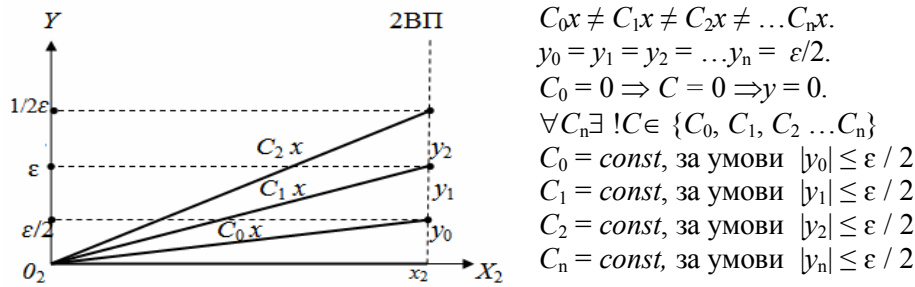


Рис. 7. Графічне пояснення коефіцієнта C

Крок 2. Використовуємо систему координат X_2O_2Y . Слід зазначити, що на практиці різниця показів рівнів води по ВП $z_i - z_j \neq const$. З урахуванням того, що прирости змін функції є двома незалежними змінними (рух судна і різниця показів ВП), то зміни точок по осях абсцис і ординат описуються функцією двох незалежних змінних $z = f(x, y)$ з фіксованою декартовою системою координат.

Припустимо, що її аргументи x і y отримують прирости Δx і Δy , тоді функція $z = f(x, y)$ отримує повний приріст

$$\Delta z = f(x + \Delta x, y + \Delta y) - f(x, y).$$

Геометрично повний приріст Δz дорівнює збільшенню аплікати графіка функції $f(x, y)$ при переході від точки $B(x, y)$ у точку $B^{(1)}(x + \Delta x, y + \Delta y)$. Функція $z = f(x, y)$ є диференційованою в точці $B(x, y)$, так як її повний приріст Δz можна представити у вигляді

$$\Delta z = B_i(x, y)\Delta x + B_j(x, y)\Delta y + 0(\rho),$$

де $\rho = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2}$, $0(\rho)$ – нескінченно мала величина вищого порядку.

Враховуючи, що функція $z = f(x, y)$ диференційована в цій точці, за повний диференціал приймемо $dz = B_i(x, y)\Delta x + B_j(x, y)\Delta y$.

$$\begin{cases} z = f(x, y), \\ dx = \Delta x, \Rightarrow \Delta z \approx dz + f'_x(x, y)dx + f'_y(x, y)dy, \\ dy = \Delta y. \end{cases}$$

$$f(x + \Delta x, y + \Delta y) \approx f(x, y) + dz = f(x, y) + f'_x(x, y)dx + f'_y(x, y)dy. \quad (14)$$

Функція $z = f(x, y)$ у системі координат X_2O_2Y є складна функція, тоді

$$\begin{cases} \begin{cases} x = \varphi(t), \\ y = \psi(t) \end{cases} \Rightarrow z = f(x(t), \psi(t)) \Rightarrow \frac{dz}{dt} = \frac{\partial z}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} \Rightarrow \\ \Rightarrow y = \varphi(x) \Rightarrow z = f(x, \varphi(x)) \Rightarrow \frac{dz}{dx} = \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial z}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dx}. \end{cases} \quad (15)$$

Використовуючи властивість інваріантності формули повного диференціала, отримуємо

$$dz = \frac{\partial z}{\partial x} dx + \frac{\partial z}{\partial y} dy. \quad (16)$$

Таким чином, виходячи з виразів $z = f(x, y)$, (13), (16) і рис. 7 загальне рішення диференціального рівняння першого порядку з двома змінними ($n = 2$) матиме вигляд

$$X_2 O_2 Y \Rightarrow z = Cx(t) + k\delta h(t)x(t) = k(\overline{C + \delta h(t)}) \cdot x(t), \quad \delta h_i \equiv \delta(h_2 - h_1), \quad (17)$$

де δh_i – миттєва різниця рівнів води по ВП у системі координат $X_2 O_2 Y$.

$$k = \begin{cases} 0, & \text{при } |\Delta h_i| \leq \frac{\varepsilon}{2}; \\ \text{round} \frac{2 \cdot |\Delta h_i|}{\varepsilon}, & \text{при } |\Delta h_i| > \frac{\varepsilon}{2}, \quad m(\text{HCP}) < k \cdot (C_i + \Delta h_i) x_i < M(\text{BCP}). \end{cases}$$

Крок 3. Перейдемо до знаходження поправок h до вимірних глибин, що змінюються за часом t_i , у відносній системі координат $X_1 O_1 Y$.

Центр O_1 системи координат $X_1 O_1 Y$ є нуль глибин 1ВП на осі суднового ходу. Причому нулі глибин 1ВП і 2ВП співпадають. Положення рухомої системи координат $X_2 O_2 Y$ змінюється відносно $X_1 O_1 Y$ тільки по осі ординат Y . У даному випадку ($n = 3$) функція трьох змінних $h = f(x, y, z)$ з фіксованою декартовою системою координат належить до точок площини $X_1 O_1 Y$. Аналогічно до кроків 1, 2 визначимо загальне рішення функції $h = f(x, y, z)$

$$X_1 O_1 Y \Rightarrow h = (\overline{C + k\delta h(t)}) \cdot x(t) + h_1(t), \quad (18)$$

де h_i – миттєвий рівень води по 1ВП у системі координат $X_1 O_1 Y$;

δh_i – миттєва різниця рівнів води по ВП у системі координат $X_1 O_1 Y$;
 $\delta h_i = (X_2 O_2 Y \cap X_1 O_1 Y) : (X_2 O_2 Y \subseteq X_1 O_1 Y)$.

Крок 4. Розглянемо поведінку функції трьох змінних $h = f(x, y, z)$ у системі координат карти XOY . Обов'язкові умови, які повинні витримуватися:

висотна основа ЕНС в абсолютній системі висот повинна бути єдиною;

$$\text{dom} \forall R \in Y(0) = \text{const},$$

система координат $X_1 O_1 Y$ нерухома відносно $XOY \supseteq X_1 O_1 Y$;

$$\text{dom} (h = f(x, y, z)) \in X_1 O_1 Y \wedge XOY;$$

$$\bar{Y} = X_1 O_1 Y \cap XOY, \quad \underline{Y} = X_1 O_1 Y \cap XOY, \quad \text{при умовах } Y \leq \bar{Y}, Y \geq \underline{Y}.$$

Враховуючи вищевикладене, використовуючи вираз (18) і встановлені обмеження $0 < M_{\text{опр}} \leq 5$ визначаємо формулу для усунення невизначеності ситуаційної динаміки використання деталізованого банку глибин у n -мірному просторі при русі судна

$$X \ 0Y \Rightarrow h(t) = k(\overline{C + \delta h(t)}) \cdot x(t) + h_1(t), \quad (19)$$

Вираз (19) визначає диференціальні поправки $h(t)$ до вимірних глибин, які позначені на SENC, і може служити основою для їх автоматизованого визначення.

Для інтелектуальної обробки потоку даних застосовані символічно-формалізовані перетворення Лапласа з використанням наступних властивостей:

$$f(t) \xrightarrow{L} F(p) = \begin{cases} p \cdot F(p) - f(0), \\ \mu \cdot F(\mu \cdot p), \\ e^{-p \cdot \tau} F(p), \\ F(p + p_0) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{-(p+p_0)t} dt. \end{cases} \quad (20)$$

Далі вираз (19) представимо у вигляді двох незалежних змінних, пов'язаних часом t : $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$.

Перетворення першої складової $f_1(t)$. Використовуючи вираз лінійності потоку даних (20), вирішимо систему лінійних рівнянь з постійними коефіцієнтами із застосуванням операційного методу.

$$\frac{d\vec{x}}{dt} = A\vec{y} + \vec{f}(t), \quad \vec{y} = \begin{Bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}, \quad \vec{f}(t) = \begin{Bmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_n \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{Bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{Bmatrix}, \quad 0 \leq t \leq +\infty,$$

де A – матриця $n \times n$ стану об'єкта (динамічна матриця об'єкта).

$$\text{Задаємо початкові дані у вигляді вектора } \vec{y}(0) = \vec{q}, \quad \vec{q} = \begin{Bmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{Bmatrix}.$$

$$f_k(t) \xrightarrow{L} \tilde{f}_k(p) \Rightarrow y_k(t), \ y'_k(t) - \text{оригінали.}$$

$$y_k(t) \xrightarrow{L} \tilde{y}_k(p), \quad y'_k(t) \xrightarrow{L} p \cdot \tilde{y}_k(p) - y_k(0) = p \cdot \tilde{y}_k(p) - q_k.$$

$$p \cdot \tilde{y}_k(p) - q_k = a_{k1} \tilde{y}_1(p) + a_{k2} \tilde{y}_2(p) + \dots + a_{kn} \tilde{y}_n(p) + \tilde{f}_k(p), \quad k=1, 2 \dots n.$$

Зображення, зібрані в єдиний стовпець

$$\tilde{y}(p) = \begin{Bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \vdots \\ \tilde{y}_n \end{Bmatrix}, \quad \tilde{f}(p) = \begin{Bmatrix} \tilde{f}_1(p) \\ \vdots \\ \tilde{f}_n(p) \end{Bmatrix},$$

$$p \cdot \tilde{y}(p) - \bar{q} = A \cdot \tilde{y}(p) + \tilde{f}(p), \quad \tilde{y}(p) = (p \cdot E - A)^{-1} \cdot (\tilde{f}(p) + \bar{q}),$$

де E – одинична матриця.

По $\tilde{y}_k(p)$ знаходимо $y_k(t)$

$$y_k(t) = L\{\tilde{y}_k(p)\} = (p \cdot E - A)^{-1} \cdot (\tilde{f}(p) + \bar{q}) \quad (21)$$

Вираз (21) є матрична передаточна функція потоку даних від ВП. Матриця $(pE-A)$ – характеристична матриця для матриці стану A . Її визначник $\det(pE-A)$ є степеневий поліном змінної Лапласа p порядку n .

$$y_k(t) = \frac{1}{\det(pE-A)} S(p) \cdot B, \quad B = x, \quad (22)$$

де $S(p)$ – *adj* (союзна матриця) для $(pE-A)$ з урахуванням заданого вектора.

$$S(p) = \|\tilde{f}_{n,1}\| + \|q_{n,1}\| \quad (23)$$

Матрична передавальна функція $y_k(t)$ являє собою прямокутну матрицю розмірності $m \times n$. Кожен елемент цієї матриці є скалярна передавальна функція від входу до виходу (рис. 8). Усі скалярні передавальні функції мають один і той же характеристичний поліном. Тому аналіз потоку даних від ВП зводиться до аналізу коренів цього полінома.

Перетворення складової $f_2(t)$

$$f_2(t) \xrightarrow{L} F_2(p) \Rightarrow F_2(p) = \int_0^{\infty} f_2(t) \cdot e^{-pt} dt = \int_0^{\infty} (y_{01ВП} + \delta y_{01ВП}(t)) \cdot e^{-pt} dt = y_{01ВП} \int_0^{\infty} e^{-pt} dt + \int_0^{\infty} \delta y_{01ВП}(t) dt.$$

$$e^{-pt} \Big|_{t=0}^{0+\infty} = 1, \quad y_{01ВП} \int_0^{0+\infty} e^{-pt} dt = y_{01ВП} + h_{10}, \quad \int_0^{\infty} \delta y_{01ВП}(t) dt \equiv \|(\delta y_{01ВП})_{i,1}\|, \quad h_{10} = h_{20} \cdot y_{01ВП} = y_{02ВП}$$

$$f_2(t) = y_{01ВП} + h_{10} + \|(\delta y_{01ВП})_{i,1}\|,$$

де $y_{01ВП}$ – нуль глибин 1ВП;
 $\delta y_{01ВП}$ – миттєвий рівень води відносно $y_{01ВП}$;
 $\|(\delta y_{01ВП})_{i,1}\|$ – матриця-стовпець змін $\delta y_{01ВП}$;
 h_{10} – можливі зміни $y_{01ВП}$ відносно абсолютної системи координат;
 $y_{01ВП} = y_{02ВП}$, $h_{10} = h_{20} = \text{const}$.

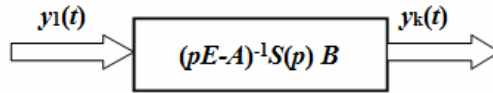


Рис. 8. Скалярна передаточна функція від входу до виходу

Одержуємо повний вираз для отримання диференціальних поправок $h(t)$ до виміряних глибин, які позначені на SENC

$$h(t) = \frac{1}{\underbrace{\det(pE - A)}_{(C)_{h,j}}} S(p) \cdot B + \underbrace{y_{01ВП} + h_{10}}_{const} + \|(\delta y_{01ВП})_{i,1}\|.$$

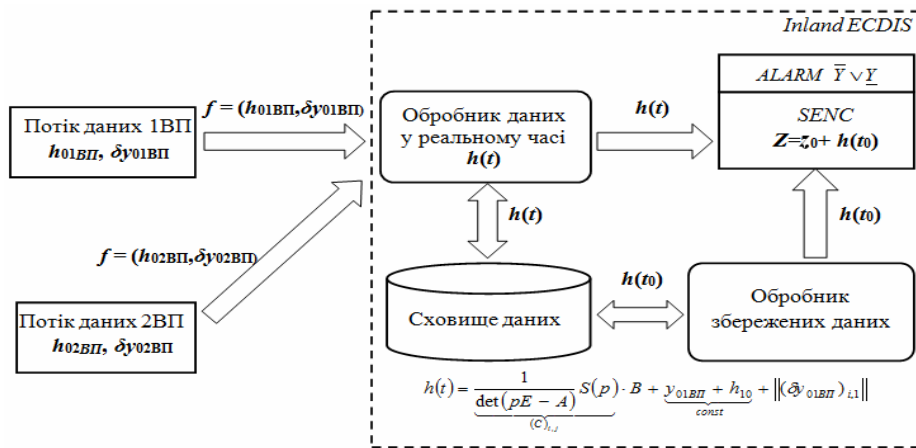


Рис. 9. Концептуальна модель системної архітектури отримання диференційних поправок від двох ВП

Висновки. Запропонований метод автоматизації відображення фактичних глибин на електронній карті шляхом реалізації методів обчислювального інтелекту сприятиме надійності вирішення навігаційних задач для підвищення безпеки руху ВТЗ з урахуванням специфіки функціонування транспортної системи України.

Особливістю викладеної методології системної оптимізації структури і стратегії використання деталізованого масиву глибин є подолання багатокритеріальності оптимізаційних завдань, визначення їх обсягу і якості, подолання ряду невизначеностей, які неминучі при використанні принципів системного підходу тощо. Наведені вище математичні вирази включають сукупність логічно пов'язаних між собою теоретичних основ щодо усунення невизначеності ситуаційної динаміки у n -мірному просторі і вирішення нової наукової проблеми.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Богомья В.І. *Навігаційне забезпечення управління судном: Колективна монографія / В.І. Богомья, В.С. Давидов, В.В. Доронін, В.Д. Пашков, І.В. Тихонов.* – К.: Міністерство освіти і науки, 2012. – 335 с.
2. Доронін В.В. *Системна технологія розв'язку оперативних задач навігації для синтезу законів експлуатації водного транспорту // Системи обробки інформації: Зб. наук. праць Харківського університету Повітряних Сил України.* – Харків: Вид-во ХУПСУ, 2015. – Вип. 10 (135). – С. 186-191.
3. Баранов Г.Л., Доронін В.В., Косенко В.Р., Прохоренко Д.М. *Алгебраїзація маршрутів руху транспортних засобів // Інформаційні процеси, технології та системи на транспорті. Національний транспортний університет.* – К.: Вид-во НТУ, 2014. – Вип. 1. – С. 60-70.
4. Катенин В.А. *Навигационно-гидрографическое обеспечение судоходства на внутренних водных путях: Учебн. пособие / В.А. Катенин, А.В. Зернов, Г.Г. Фадеев.* – М.: Изд-во Моркнига, 2010. – 344 с.
5. Баранов Г.Л. *Структурне моделювання та символні перетворення для управління рухом транспортних засобів: Колективна монографія / Г.Л. Баранов, А.М. Носовський, В.В. Панин, І.В. Тихонов, С.М. Васько.* – К.: Міністерство освіти і науки, 2014. – 310 с.
6. Баранов Г.Л., Доронін В.В., Алейніков В.М. *Методи прийняття рішень в умовах невизначеності на акваторіях судноводіння // Матеріали міжнародної наукової конференції ISDMCI'2016: Зб. наук. праць Херсонського національного технічного університету.* – Херсон: Видавництво ПП Вишемирський В.С., 2016. – С. 31-32.

7. Каретников В.В. Перспективи розвитку електронних навігаційних карт внутрішніх водних шляхів Російської Федерації // Річковий транспорт (XXI століття). – Росія. – 2014. – Вип. № 1. – С. 72.
8. Коломийчук М.Д. Гідрографія: Учбовий посібник / М.Д. Коломийчук. – СПб.: Видавництво ЦКФ ВМФ, 1988. – 366 с.

Стаття надійшла до редакції 27.12.2017

Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, професор кафедри Інформаційних систем і технологій Національного Транспортного університету України **Г.Л. Баранов**

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Суднобудівництва та керування судном Державного університету інфраструктури та технологій **О.М. Майборода**