

Фуклєв О.І., Ярмак В.Л.

МЕТОД УПРАВЛІННЯ МАНЕВРУВАННЯМ СУДНА НА МІЛКОВОДДІ

У статті визначено, що одним із шляхів оптимізації управління рухом судна в різних умовах руху є створення систем, що застосовують метод, здатний адаптуватися відповідно до цих умов. Результати досліджень свідчать, що отримана адаптивна модель руху судна відповідає основним законам гідромеханіки та разом з алгоритмом адаптації може бути використана як базова при синтезі адаптивного методу управління рухом судна. У статті удосконалено адаптивний метод управління маневруванням судна на мілководді, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність настроюваних коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

Ключові слова: судноводіння, безпека судноплавства, безпека на морі, навігація, стислі води, попередження зіткнення суден, маневрування, маршрут судна, метод управління, морський транспорт

Вступ. Одним із шляхів оптимізації управління рухом судна в різних умовах руху є створення систем, що застосовують метод, здатний адаптуватися відповідно до цих умов. Однак перебудова параметрів моделі або її зв'язків на підставі маневрених якостей, отриманих у процесі ходових випробувань судна, не може дати прийнятних результатів через значну кількість факторів, що впливають на рух судна, та складності їх аналітичного представлення. Широкі можливості надаються при використанні адаптивних методів, які налаштовуються на підставі завдання ідентифікації модельованого процесу з реальним процесом руху судна в момент настроювання. Таким чином, виникає актуальне завдання розроблення адаптивного до умов мілководдя методу управління маневруванням судна.

Аналіз літературних джерел. Вплив стінок судна під час звичайних випробувань на стійкість під час маневрування кількісно оцінено в роботі [1]. Течія навколо моделі судна чисельно отримується за допомогою моделі об'єму рідини (VOF). Вплив ширини судна досліджується на основі чисельних розрахунків та модельних випробувань одного й того самого судна з різним масштабом.

Зроблено висновок, що вплив стінок судна під час випробування на стійкість є незначним, якщо ширина судна W в 5 разів перевищує ширину балки B ($W/B > 5$). Слід зазначити, що це перевіряється тільки для глибокої води ($h/T > 7,5$) і, отже, при відносно невеликій глибині води – залежні числа Фруда Fr_h .

В роботі [2] спочатку проблема вирішується в 2D розрахунковій моделі. За допомогою того ж CFD-пакету, що і в [3], зроблено розрахунки для створення регресійної моделі для впливу берегів. Ця модель враховує кут дрейфу і порівнюється з модельними тестами. Математична модель реалізована в симуляторі маневрування судна та протестована.

CFD розрахунки з доступним усередненим методом Рейнольдса Navier Stokes Equation (RANSE) моделлю (Fluent) наведені в роботі [3]. Модель турбулентності SST $k - \omega$ прийнята для врахування в'язкої течії на мілководді. Деякі з розрахунків порівнюються з опублікованими результатами модельних випробувань [4]. Також розраховано багато варіацій положення в поперечному перерізі та глибин води.

Панельний метод (3D Ренкіна першого порядку) був прийнятий для розрахунку сили качки і рискання, викликаних вертикальним і похилим ($1/3$) берегом на контейнеровозі вантажопідйомністю 8 000 TEU. Ці розрахунки порівнюються з опублікованими відкритими даними про вплив крену [5].

У науковій роботі [6] наводиться порівняння між CFD-розрахунками і модельними тестами з VLCC на різних глибинах й вздовж різних типів похилих берегів різного типу. Основна увага приділяється невизначеності розрахунків та вимірювань. Доводиться, що метод RANS може задовільно врахувати деякі параметри маневрування судна у стиснених водах. Набагато менше це стосується (старішого) методу потенційного потоку, який не враховує в'язкість, оскільки у ньому рідина є ідеалізованою. В той же час відсутні, окрім емпіричних, формалізація методу маневрування судном на мілководді, що може бути реалізованих у знанняорієнтованих системах підтримки прийняття рішення судноводіння.

Мета статті: розроблення адаптивного до умов мілководдя методу управління маневруванням судном на мілководді.

Основна частина. Принципи формування процесів ідентифікації та адаптації параметрів моделі руху судна на мілководді можна подати функціональними елементами (рис. 1).

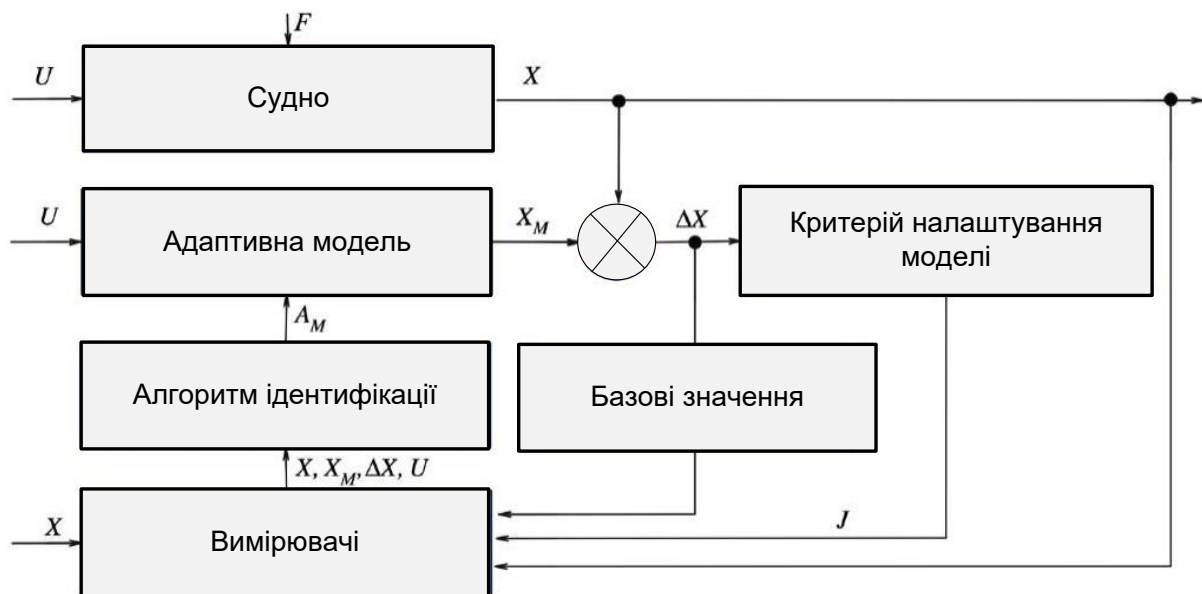


Рисунок 1 – Узагальнена адаптивна модель руху судна

Порядок функціонування елементів розробленої схеми полягає в такому.

У кожний момент часу до входів судна та адаптивної моделі додані керуючі дії (U). На судно діють також зовнішні збурення (F), які можуть бути вимірюваними. Вектор стану судна (X) залежить від керуючого впливу, зовнішніх збурень та вектора параметрів моделі судна на даний момент (A), отриманий на попередньому етапі ідентифікації, що характеризують динамічні якості судна.

Вектор стану адаптивної моделі (X_M) залежить від вектора настроюваних параметрів (A_M), які перераховуються за поточним алгоритмом ідентифікації. Цей алгоритм функціонує на основі обробки вимірювань вектора стану судна та моделі, їх неузгодженості ($\Delta X = X - X_M$), критеріїв якості та налаштування адаптивної моделі (J). Оскільки алгоритм ідентифікації визначається прийнятою адаптивною моделлю ідентифікованого об'єкта та критерієм якості ідентифікації, що оцінює їх близькість, однозначний вибір алгоритму можливий лише за однозначного вибору адаптивної моделі та критерію.

Теорія ідентифікації надає широкий вибір настоюваних моделей [7, 8]. Однак, як правило, ці математичні моделі можуть бути застосовні для часткових режимів руху судна. У роботі [9] досліджується узагальнена адаптивна прогноуюча модель руху судна за різних умов плавання. В якості вихідної для подальшої адаптації пропонується використовувати нелінійну модель руху судна:

$$\dot{x}_{1M} - x_{2M} = 0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{2M} + a_{1M}x_{4M}x_{6M} + a_{2M}n + a_{3M}\delta &= 0, \\
\dot{x}_{3M} - x_{4M} &= 0, \\
\dot{x}_{4M} + a_{4M}x_{2M}x_{6M} + a_{5M}n + a_{6M}\delta &= 0, \\
\dot{x}_{5M} - x_{6M} &= 0, \\
\dot{x}_{6M} + a_{7M}x_{2M}x_{4M} + a_{8M}n + a_{9M}\delta &= 0,
\end{aligned}$$

представлену у просторі станів:

$$\begin{aligned}
a_{1M} &= \frac{m + \lambda_2}{m + \lambda_1}, a_{4M} = \frac{m + \lambda_1}{m + \lambda_2}, a_{7M} = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{I_z + \lambda_3}, \\
a_{2M} &= \frac{b_1}{m + \lambda_1}, a_{5M} = \frac{b_3}{m + \lambda_2}, a_{8M} = \frac{b_5}{I_z + \lambda_3}, \\
a_{3M} &= \frac{b_2}{m + \lambda_1}, a_{6M} = \frac{b_4}{m + \lambda_2}, a_{9M} = \frac{b_6}{I_z + \lambda_3}, \\
\dot{x}_{1M} = x_{2M} = V_x; \dot{x}_{3M} = x_{4M} = V_y; \dot{x}_{5M} = x_{6M} = \omega; \\
x_M &= [x_{1M}, \dots, x_{6M}]^T, A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}]^T.
\end{aligned} \tag{2}$$

Адаптивну ідентифікацію моделі (2), як процес управління її параметрами на відповідність реальному руху судна, пропонується здійснювати методом аналітичного конструювання оптимальних регуляторів (АКОР) за мінімумом квадратичного критерію узагальненої роботи (КУР), тобто сумарних дій керуючих впливів та неузгодженості виходів адаптивної моделі з реальним рухом судна (див. рис. 1). Метод АКОР для синтезу систем управління та поняття критерію узагальненої роботи отримали апробацію та додатки у дослідженнях з розробки систем навігації та управління судном [10, 11].

Тоді, квадратичним КУР оцінки якості ідентифікації моделі руху судна (2) є:

$$\begin{aligned}
J &= W_K[\Delta X, X_M, A_M] \exp\left(\frac{t}{T_j}\right) + \frac{1}{2} \int_t^{t+T} \Delta X^T Q_x \Delta X \exp\left(\frac{t}{T_j}\right) dt \\
&+ \frac{1}{2} \int_t^{t+T} [U_A^T K_A^{-2} U_A + U_{A,op}^T K_A^{-2} U_{A,op}] dt; \\
K_A^{-2} &= K^2 \exp\left(\frac{2t}{T_j}\right),
\end{aligned} \tag{3}$$

де J – квадратичний КУР оцінки якості ідентифікації; W_K – квадратична функція кінцевої оцінки якості ідентифікації; Q_x – діагональна матриця квадратичної форми неузгодженості векторів стану моделі та реального судна; K_A^{-2} – діагональна матриця ваги доданків критерію якості ідентифікації (обирається пропорційно швидкостям зміни настанованих параметрів); T – інтервал оптимізації процесу адаптації моделі; T_j – постійна часу згасання критерію узгодження; U_A – вектор управління процесом ідентифікації (відповідає швидкості зміни налаштовуваних параметрів).

Оскільки процес ідентифікації нелінійний та нестационарний експоненційні множники введені для забезпечення позитивної визначеності мінімізуючої функції критерію узгодження (3) та його згасання. Його застосування далі підтверджується результатами моделювання процесів ідентифікації моделі.

Таким чином, завдання ідентифікації зводиться до оптимізації КУР (3) управління швидкостями зміни настроюваних параметрів узагальненої адаптивної моделі (2).

Відповідно до основної теореми аналітичного конструювання оптимальних регуляторів КУР (3), оптимізація управління перебудовою параметрів адаптивної моделі з урахуванням змін, аналогічних наведеним у роботах [10, 11], зводиться до розв'язання матричних лінійних рівнянь,

що мінімізують неузгодженість руху моделі з реальним процесом:

$$\begin{aligned} \dot{P}_X + \frac{1}{T_J} P_X - J_X^T P_X &= -Q_X [X_M - X]; & P_X &= \left[\frac{\partial W_M}{\partial X_M} \right]; \\ \dot{P}_A + \frac{1}{T_J} P_A &= J_X^T P_X; & P_A &= \left[\frac{\partial W_A}{\partial X_A} \right]; \end{aligned} \quad (4)$$

$$J_X = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & a_{4M}x_{6M} & 0 & a_{7M}x_{4M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{6M} & -1 & 0 & 0 & a_{7M}x_{2M} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{1M}x_{4M} & 0 & a_{4M}x_{2M} & -1 & 0 \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$J_A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_{4M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{6M} & n & \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{2M}x_{4M} & n & \delta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

де P_X – вектор проєкцій функції W_K , що мінімізує критерій 3), на вектор стану моделі судна; P_A – вектор проєкцій функції W_K на вектор налаштованих параметрів моделі; J_X , J_A – матриці Якобі, утворені з функціональних залежностей рівняння стану моделі (2) за векторами стану й параметрами, відповідно.

У результаті шукане оптимальне керування швидкістю налаштування параметрів адаптивної моделі (2), що забезпечує мінімум КУР (3) та її узгодження з реальним рухом судна, набуде вигляду:

$$U_{\text{оп}} = \dot{A}_M = K_A^{-2} P_A. \quad (7)$$

Розв'язання систем диференціальних рівнянь (5)-(7) дає адаптивну модель горизонтального руху судна, настроювану значеннями гідродинамічних коефіцієнтів, оптимальних за КУР (3) для конкретного режиму руху та умов плавання на мілководді. При роботі алгоритму ідентифікації та оптимізації адаптивної моделі її параметри будуть залежати від поточних вимірювань вектора стану (X) та вектора стану адаптивної моделі (X_M) (рис. 2).

Отже, похибки вимірювання вектора стану судна будуть корельованими з похибками параметрів моделі. Тому матрицю квадратичної форми (Q_X) похибок моделі в КУР (1) доцільно задавати у вигляді коваріаційної матриці похибок вимірів ($Q_X = R^{-1}$).

Для роботи методу адаптації (4)-(5) моделі маневрування судном на мілководді (2) в якості початкових умов доцільно використовувати значення векторів стану та параметрів, характерних для режимів руху конкретного судна прямому курсі, циркуляції.

З фізичного погляду алгоритми адаптації моделі (5)-(7) представляють собою динамічну систему, зовнішнім впливом на яку є неузгодженість між векторами стану моделі та судна [$X_M - X$]. Динаміка даної системи залежить від параметрів моделі (2) її стану та постійного часу згасання за критерієм якості (T_J).

Постійна часу згасання, у свою чергу, повинна обиратися в залежності від нестационарності моделі руху судна (2). Малі значення постійного часу методу адаптації (5)-(7) відповідатимуть локальній оптимізації властивостей моделі (2), тобто, в околиці цієї точки траєкторії руху судна, та диференціальні рівняння (4) перетворюються в алгебраїчні. Такі значення постійного часу згасання доцільно вибирати для малих відрізків руху (маневрування) судна. Значення постійного часу

загасання на тривалих ділянках руху судна необхідно обирати відповідно більшими для оптимізації параметрів моделі (2) для всієї ділянки руху судна.

Рівняння (7) є інтегруючими ланками, виходами, які у разі збільшення значень параметрів залежать від величини вхідного сигналу (P_A) та коефіцієнтів відповідних посилень (K_A^2) системи адаптації.

Отже, значення параметрів моделі матимуть збільшення при ненульових розв'язках рівнянь (4), тобто за наявності неузгодженостей векторів станів моделі та судна (див. рис. 2). Результати рішень рівнянь (5) можуть бути ненульовими навіть за умови збігу векторів станів моделі та судна, й у даному випадку залежатимуть від самих параметрів судна (7), а також значень вектора стану моделі (1). Таке явище характерне при повороті судна або зміні режиму роботи двигуна. Це повністю підтверджує реальні фізичні процеси, що відбуваються при маневруванні судна, які впливають з теоретичних та експериментальних досліджень з керованості судна. Для підтвердження теоретичних положень проводилось експериментальне моделювання за даними руху імітаційної моделі швидкохідного, стійкого на курсі судна водотоннажністю 700 т на спокійній воді зі швидкістю 14 вузлів, отримані з використанням судноводійського тренажера.

За формулами (1) у середовищі MATLAB Simulink побудовано модель руху судна у системі прямокутних координат. Вихідні параметри моделі руху судна $A_M = [a_{1M}, \dots, a_{9M}]$ обрані довільно на підставі рекомендацій, наведених у роботі [12] (таблиця 1).

Таблиця 1 – Початковий довільний набір коефіцієнтів моделі

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	0,0005	a_{4M}	0,0001	a_{7M}	0,011
a_{2M}	0,00004	a_{5M}	0,00004	a_{8M}	0,000001
a_{3M}	0,0000001	a_{6M}	0,013	a_{9M}	0,2542

Результати моделювання наведені на рис. 2.

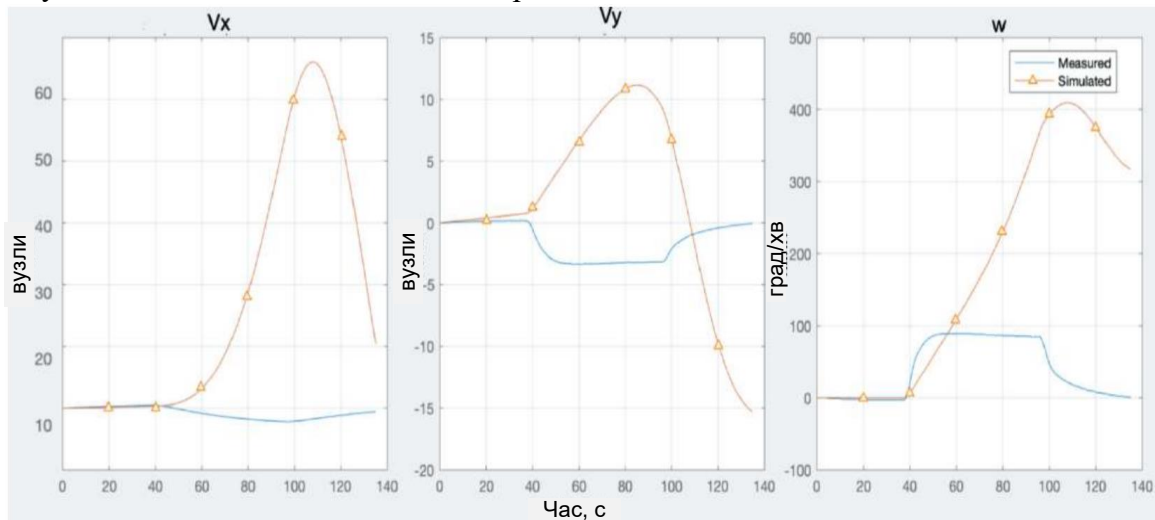


Рисунок 2 – Моделювання руху судна на повороті з вихідним набором параметрів моделі

Далі на основі вихідних параметрів моделі (2) налаштовуються або адаптуються її параметри у процесі маневрування за цими ж вимірами за допомогою формул (5)-(7). Процес налаштування та зміни коефіцієнтів моделі наведений на рис. 2, з якого видно, що процес адаптації зайняв 26 ітерацій, а найбільших змін зазнали лише коефіцієнти (a_{7M}) та (a_{9M}), що враховує вплив проекцій лінійних швидкостей та перекладання керма.

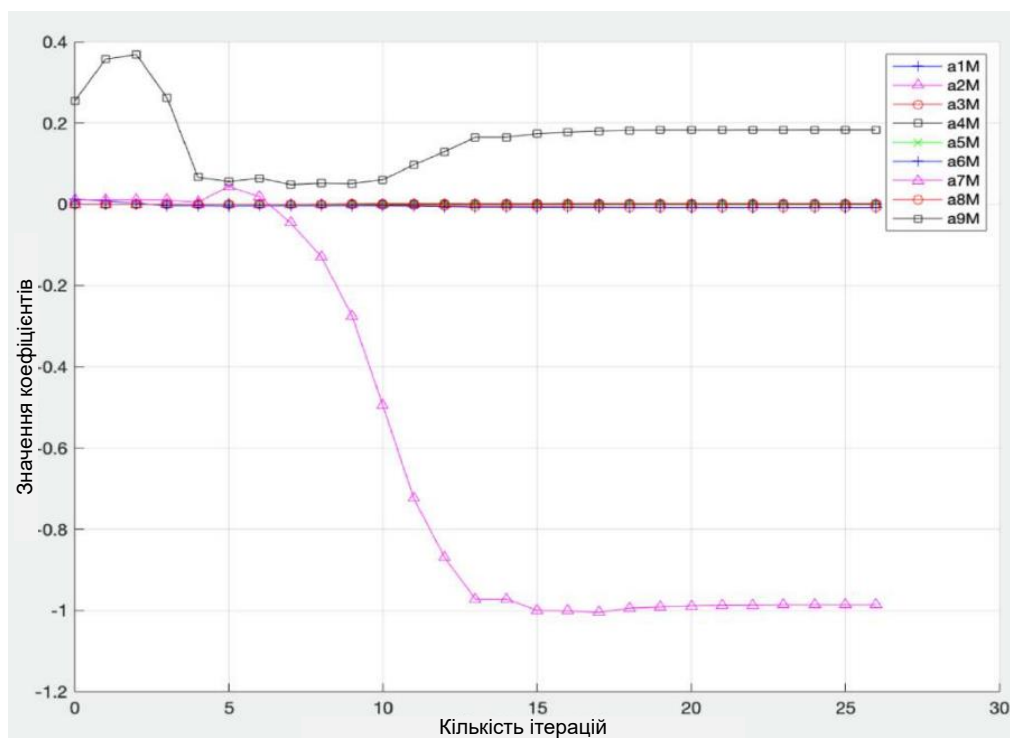


Рисунок 3 – Ідентифікація гідродинамічних коефіцієнтів моделі руху судна на повороті

Значення уточнених ідентифікованих параметрів моделі (1) наведено в табл. 2, а результати моделювання руху судна з підстроєними алгоритмом адаптації ідентифікованими параметрами моделі – на рис. 4, що демонструє значне покращення якості прогнозування руху судна в порівнянні з даними рис. 3.

Таблиця 2– Значення ідентифікованих коефіцієнтів моделі руху

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	-0,000289	a_{4M}	0	a_{7M}	-0,98612
a_{2M}	0,0001104	a_{5M}	0,0015117	a_{8M}	0,0020759
a_{3M}	-0,007399	a_{6M}	-0,008235	a_{9M}	0,18333

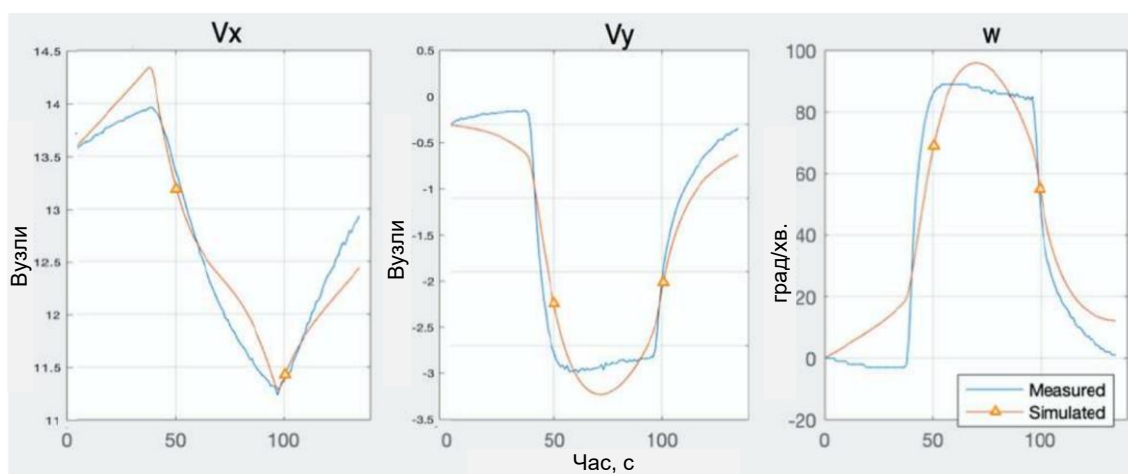


Рисунок 4 – Моделювання руху судна на повороті з ідентифікованим набором параметрів моделі руху судна

Перевірка працездатності моделі руху судна (1) проводилась на незалежному наборі даних, отриманих при маневруванні у змінних умовах плавання (вітер 10 м/с – 1 400, хвилювання моря 2,0 м – 1 600) (рис. 5).

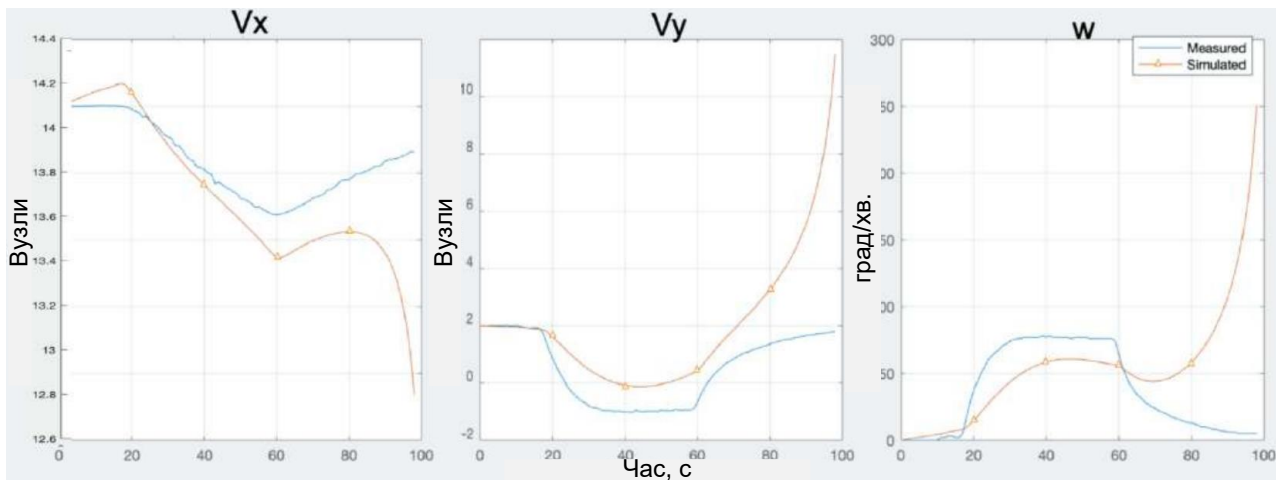


Рисунок 5 – Моделювання руху судна на повороті у змінних умовах плавання

Результати свідчать, що елементи руху судна з коефіцієнтами інших умов значно відрізняються від вимірювань параметрів руху судна, особливо після 60-ої секунди маневру. Це підтверджує необхідність їх адаптації.

Процес переналаштування параметрів адаптивної моделі (1) за формулами (5)-(6) під час руху судна на повороті наведено на рис. 6.

Кількість ітерацій при адаптації коефіцієнтів моделі руху судна у даному випадку знизилася до 15, найбільшій зміні піддавався коефіцієнт (a_{9M}), що враховує вплив перекладки керма у мінливих умовах плавання.

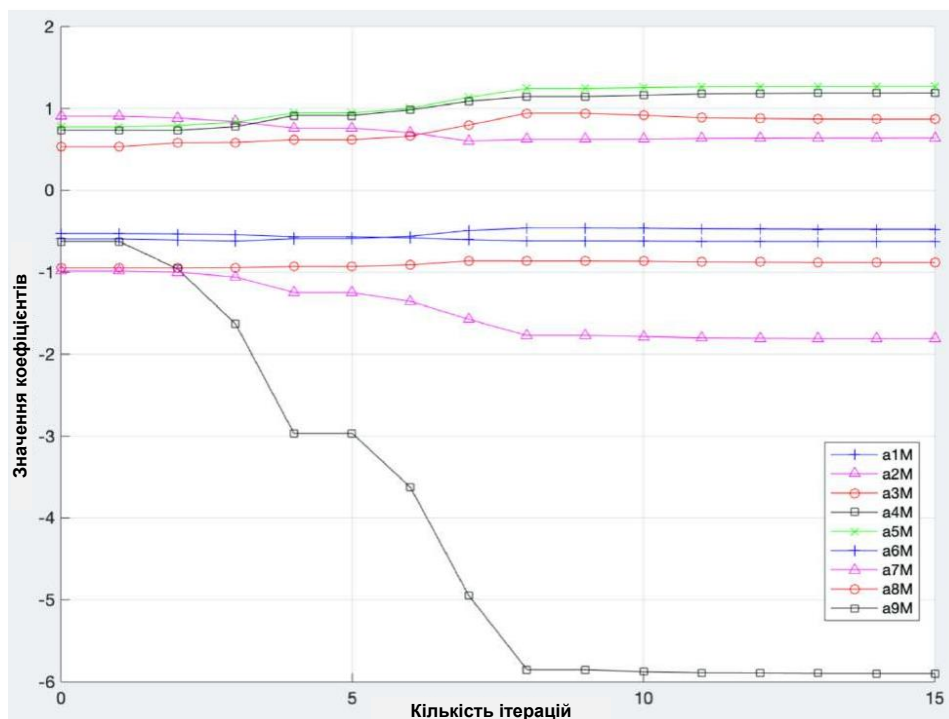


Рисунок 6 – Адаптація гідродинамічних коефіцієнтів моделі руху судна на повороті

Як зазначалося вище, коефіцієнти моделі руху судна (1) змінюються під впливом різних факторів та повинні підлаштовуватися, зокрема, до зовнішніх умов руху судна. Значення

адаптованих параметрів моделі (2) під нові, відмінні від попередніх, умови плавання судна наведені в табл. 3. Результати моделювання руху за адаптованою моделлю судна (1) до нових умов наведена на рис. 7.

Таблиця 3 – Набір адаптованих коефіцієнтів моделі

V_x		V_y		ω	
a_{1M}	-0,000231	a_{4M}	-0,00017	a_{7M}	-1,8072
a_{2M}	0	a_{5M}	0,0024736	a_{8M}	0,0033926
a_{3M}	0,0068688	a_{6M}	-0,009773	a_{9M}	0,29731

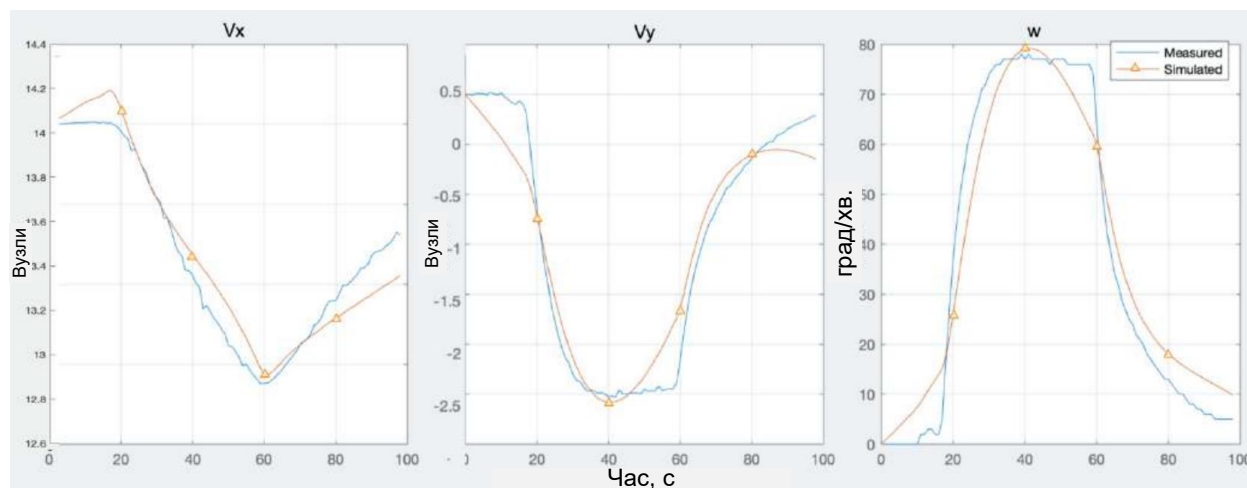


Рисунок 7 – Моделювання руху судна на повороті у змінних умовах плавання з адаптованим набором коефіцієнтів

Висновки. Результати проведених досліджень свідчать, що отримана адаптивна модель руху судна відповідає основним законам гідромеханіки та разом з алгоритмом адаптації може бути використана як базова при синтезі адаптивного методу управління рухом судна.

Час, який витрачається на адаптацію такої моделі, а також необхідність мати весь часовий ряд виміряних параметрів руху судна під час виконання маневру вимагає застосування комп'ютера з достатньо високою продуктивністю за безпосереднього використання алгоритму у САУ судна під час здійснення ним маневрування на мілководді.

Удосконалено адаптивний метод управління маневруванням судном на мілководді, який, на відміну від існуючих, ґрунтується на застосуванні динамічної системи управління рухом та дозволяє підвищити точність налаштованих коефіцієнтів управління судном у стиснених водах і на мілководді для систем автоматичного управління та підтримки прийняття рішень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Kumar, M. & Anantha Subramanian, V., 2007. A Numerical and Experimental Study on Tank Wall Influences in Drag Estimation. *Ocean Engineering*, 34(1), pp.192–205.
2. Chetvertakov, A.M., Lebedeva, M.P., Nikushchenko, D. V & Maritime, K., 2011. Numerical Investigation of Bank Influence on a Ship Motion. In 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction, May 18 - 20, 2011, Trondheim, Norway. pp. 83– 88.
3. Wang, H., Zou, Z., Xie, Y. & Kong, W., 2010. Numerical Study of Viscous Hydrodynamic Forces on a Ship Navigating near Bank in Shallow Water. In *Proceedings of the Twentieth International Offshore and Polar Engineering Conference*. ISOPE, pp. 523–528.

4. Vantorre, M., 2002. Modelling of Ship-Bank Interaction Forces. In IST, The Ship Interaction with the Waterway,, 13-15 June. pp. 1–17.
5. Lataire, E., Vantorre, M. & Delefortrie, G., 2009. Captive Model Testing for Ship-to-Ship Operations. In MARSIM '09 Conference, Proceedings. Panama City, Panama: [S.n.], pp. M– 14–1/10.
6. Zou, L., Larsson, L., Delefortrie, G. & Lataire, E., 2011. CFD Prediction and validation of Ship-Bank Interaction in a Canal. In B. Pettersen, T. E. Berg, K. Eltoot, & M. Vantorre, eds. Second International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction. pp. 413–422.
7. Васьков, А. С. Перспективные технологии управления процессами судовождения [Текст]/ А. С. Васьков, А. А. Мироненко // AFES 2005. The sixth international scientific forum AIMS for future of engineering science. March 23 – 30, 2005. – Hong Kong. – С. 72 – 73.
8. Odegard V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models// Norwegian University of Science and Technology, 2009. P. 100–107.
9. Панкратова, Н. Д. Квазіоптимальне згладжування як інструментарій аналізу складних слабо структурованих динамічних процесів [Текст]/ Н. Д. Панкратова, Д. Г. Стрелков // Кібернетика та системний аналіз. - 2009. - № 6. - С. 79 - 87.
10. Luo, W. Parameter Identifiability of Ship Manoeuvring Modeling Using System Identification [Text]/ Mathematical Problems in Engineering. – 2016. – Article ID 8909170 – 10 p.
11. Mironenko, A. Determining and tracking the programmed trajectory of a vessel [Text]/ A. Mironenko, A. Vaskov// Humanities & Science University Journal.– 2015. – № 13. – pp.74 – 87.
12. Yodegord, V. Nonlinear Identification of Ship Autopilot Models [Text]/ Master of Science in Engineering Cybernetics. // Norwegian University of Science and Technology. – 2009. – 100 p

Fukliev O.I., YARMAK V.

METHOD OF MANEUVERING A VESSEL IN SHALLOW WATER

The article determines that one of the ways to optimize the control of vessel movement in different conditions of movement is to create systems that use a method that can adapt to these conditions. The results of the research show that the obtained adaptive model of vessel movement corresponds to the basic laws of hydromechanics and, together with the adaptation algorithm, can be used as a base in the synthesis of an adaptive method of vessel movement control. The article improves the adaptive method of vessel maneuvering in shallow water, which, unlike existing ones, is based on the use of a dynamic motion control system and allows you to increase the accuracy of adjustable vessel control coefficients in compressed waters and in shallow water for automatic control and decision-making support systems.

Keywords: *navigation, navigation safety, safety at sea, navigation, compressed waters, vessel collision prevention, maneuvering, vessel route, control method, marine transport*