

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ СПРОЩЕНИХ УЯВЛЕНЬ НА ПРОЦЕСИ ПОВОРОТУ СУДНА

Зінченко С. М., д.т.н., доцент, професор кафедри навігації та управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: srz56@ukr.net, ORCID: 0000-0001-5012-5029;

Носов П. С., к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічної кібернетики й інформаційних технологій ім. проф. Р. В. Меркта, Одеський національний морський університет, м. Одеса, Україна, e-mail: pason@ukr.net, ORCID: 0000-0002-5067-9766.

Об'єктом дослідження є процеси повороту судна.

Точні моделі у вигляді системи диференціальних рівнянь можуть оброблятися у бортовому обчислювачі системи керування. Але на більшості суден такого спеціалізованого обчислювача немає, тому виникає необхідність оцінювати поведінку судна по спрощеним уявленням. Спрощені уявлення стали розроблятися для пояснення незвичних поведінкових ефектів, які спостерігаються на борту судна, як то видиме обертання навколо полюсу повороту, обертання судна, яке штовхають два буксири лагом, при появі поздовжньої швидкості, «віслучий» ефект, тощо. Обов'язковою умовою побудови спрощених уявлень є усталений рух судна. Так, видимий полюс повороту може спостерігатися лише на усталеній циркуляції. Під час перехідних процесів він швидко переміщується, не фіксуючись в одній точці. Спрощені уявлення повинні не тільки пояснювати незвичні поведінкові ефекти, але й узгоджуватися з базовими положеннями теоретичної механіки. На жаль, у деяких публікаціях і навіть керівництвах по управлінню судном, використовуються уявлення, які не вірно трактують поведінку судна. У роботі спростовано помилкові уявлення щодо полюса повороту, центру бокового опору і центру обертання. Отриманий результат пояснюється використанням повної математичної моделі (системи диференціальних рівнянь лінійного і кутового руху судна) як еталону, наукового підходу, положень теоретичної механіки та гідродинаміки. Критичний аналіз існуючих уявлень проведено для правильного розуміння судноводіями поведінки судна, що дозволить уникнути прийняття помилкових управлінських рішень та підвищити безпеку судноводіння.

Ключові слова: безпека судноплавства; полюс повороту; центр бокового опору; центр обертання; віслучий ефект.

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.2.31.143-155

Вступ. Питання безпеки є ключовим у судноплавстві. Від його правильного вирішення залежить цілісність судна, вантажу та людського життя. Існує декілька основних напрямів підвищення безпеки судноплавства. Одним із них є постійне підвищення компетентності (знань, умінь та навичок) судноводіїв. Проте, як показує практика, даний підхід в останні десятиліття не дає пропорційних затracченим зусиллям результатів, через, це значно зріс потік інформації для прийняття рішення і судноводіїв не встигає її обробляти в реальному часі. Другий напрям – впровадження автоматизованих систем керування, які виконують «чорнову» роботу по переробці первинної інформації, відображенні необхідних для прийняття рішення даних, формуванні попереджувальних повідомлень тощо. У таких системах управлінські рішення все одно приймаються судноводієм. Третім напрям є забезпечення міцності корпусів суден, які працюють у складних умовах навантаження [1], підвищення довговічності корпусів, шляхом використання полімерних покриттів та сучасних методів контролю [2, 3] тощо. Четвертий і найбільш радикальний напрям на сьогодні – використання автоматичних модулів керування у автоматизованих системах. Представником такого модуля на сучасних судах є авторульовий. Судноводій приймає рішення про застосування автоматичного модуля і потім лише спостерігає за його роботою. Можливості сучасних бортових обчислювачів дозволяють вирішувати і більш складні задачі, ніж підтримування руху заданим курсом чи заданим маршрутом. Вирішення деяких з них, наприклад, автоматичного скидання кінетичної енергії при неминучому зіткненні [4], автоматичного запобігання виникненню параметричного резонансу [5], автоматичного оптимального керування надлишковими структурами виконавчих пристроїв [6, 7], автоматичного обертання конвенційного одно гвинтового судна навколо полюсу повороту

[8], та інші, опубліковані авторами раніше, дозволяють суттєво підвищити надійність та ефективність систем керування.

Безпечність судноводіння залежить від коректності моделей, закладених у керівництва по судноводінню, якщо мова йде про ручне керування судном, або в математичне забезпечення, якщо мова йде про автоматичні модулі керування. Система динамічних рівнянь, яка описує лінійний (1) та кутовий (2) рух судна, наведена, наприклад, у описі математичної моделі тренажера Navi Trainer 6 [9] та багатьох інших джерелах

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \frac{\partial V_x}{\partial t} = (m + \lambda_{22}) V_y \omega_z - (m + \lambda_{33}) V_z \omega_y + \sum_{j=1}^k F_{xj}; \\ (m + \lambda_{22}) \frac{\partial V_y}{\partial t} = (m + \lambda_{33}) V_z \omega_x - (m + \lambda_{11}) V_x \omega_z + \sum_{j=1}^k F_{yj}; \\ (m + \lambda_{33}) \frac{\partial V_z}{\partial t} = (m + \lambda_{11}) V_x \omega_y - (m + \lambda_{22}) V_y \omega_x + \sum_{j=1}^k F_{zj}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} (I_x + \lambda_{44}) \frac{\partial \omega_x}{\partial t} = (I_y + \lambda_{55}) \omega_y \omega_z - (I_z + \lambda_{66}) \omega_z \omega_y + (\lambda_{22} - \lambda_{33}) V_y V_z + \sum_{j=1}^k M_{xj}; \\ (I_y + \lambda_{55}) \frac{\partial \omega_y}{\partial t} = (I_z + \lambda_{66}) \omega_z \omega_x - (I_x + \lambda_{44}) \omega_x \omega_z + (\lambda_{33} - \lambda_{11}) V_x V_z + \sum_{j=1}^k M_{yj}; \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{\partial \omega_z}{\partial t} = (I_x + \lambda_{44}) \omega_x \omega_y - (I_y + \lambda_{55}) \omega_y \omega_x + (\lambda_{11} - \lambda_{22}) V_x V_y + \sum_{j=1}^k M_{zj}. \end{cases} \quad (2)$$

Найпроблемнішою частиною таких моделей є визначення зовнішніх сил та моментів через складну взаємодію надводних та підводних елементів судна з навколишнім середовищем. Динамічні рівняння лінійного (1) та кутового (2) руху судна можуть оброблятися у бортовому обчислювачі, для прогнозування руху, вирішення інших задач автоматичного керування. Але на більшості суден такого спеціалізованого обчислювача немає, тому виникла необхідність оцінювати поведінку судна по спрощеним уявленням. Спрощені уявлення стали розроблятися для пояснення неочевидних ефектів, які спостерігаються на борту судна, як то видиме обертання навколо полюсу повороту, початок обертання судна, яке штовхають два буксири лагом, при появі поздовжньої швидкості, «віслючий» ефект тощо. При цьому, такі уявлення зводяться до визначення характеру переміщення особливих точок судна, як то центру обертання, центру бокового опору та полюсу повороту. Обов'язковою умовою побудови спрощених уявлень є усталений рух судна. Так, видимий полюс повороту може спостерігатися лише на усталеній циркуляції. Під час перехідних процесів він швидко переміщується, не фіксуючись в одній точці. На жаль, у деяких публікаціях і навіть керівництвах по управлінню судном, використовуються уявлення, які не вірно трактують поведінку судна. Такі уявлення повинні не тільки пояснювати неочевидні ефекти поведінки судна, але й узгоджуватися з математичною моделлю руху судна та базовими положеннями теоретичної механіки і гідродинаміки.

Об'єктом дослідження є процеси повороту судна.

Предметом дослідження є критичний аналіз спрощених уявлень на процеси повороту судна.

Постановка задачі. Провести критичний аналіз спрощених уявлень на процеси повороту судна та пояснити неочевидні ефекти у поведінці судна, використовуючи повну математичну модель (систему динамічних рівнянь поздовжнього і кутового руху), науковий підхід, положення теоретичної механіки та гідродинаміки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Найбільш важливими роботами за останні 40 років, пов'язаними з дослідженням поведінки судна, є роботи Н. Ноуер,

Ch. Tzeng, A. G. Chase, H. Cauvier, S. G. Seo, керівництво по судноводінню 2014 року, написане інструкторами порту Ревель.

У статті [10] розглядається поведінка судна, яке штовхають два буксири лагом із рівними силами і рівними плечами до центру обертання (автор називає його Pivot Point). При появі поздовжньої швидкості судна, воно починає обертатися. На думку автора, причиною обертання є зміщення центру обертання у напрямку руху судна, збільшення, за рахунок цього, плеча одного буксиру і зменшення плеча іншого буксиру.

Властивості полюса повороту, як умовної точки обертання, були розглянуті у статті [11]. Автор наводить формулу визначення положення полюса повороту $R = -\frac{V_y}{\omega_z}$, де V_y –

бокова швидкість судна, ω_z – кутова швидкість обертання судна відносно центру ваги. Проведено лінеаризацію диференціальних рівнянь у каналах бічного та кутового рухів, для усталеного руху наведено формулу визначення положення полюса повороту через гідродинамічні характеристики судна та керування.

Значний вклад у розуміння поведінки полюса повороту внесла стаття капітана Кав'є [12]. Вважалося, що при відхиленні стерна судно обертається навколо центру обертання, який може зміщуватися у напрямку руху судна. Практичні маневрування показали, що таке уявлення призводить до навалювання судна на стінку доку при заході або виході. Автором показано, що існуючі уявлення про полюс повороту не враховували бокову швидкість, яка виникала при відхиленні стерна. Із врахуванням цієї швидкості, судно оберталося не навколо центру обертання, а навколо іншої точки – полюсу повороту, який знаходився по іншу сторону від міделя, що і було причиною навалювання. Також, у статті детально описано інший центр – Center of Lateral Resistance (COLR), який автор вважає точкою опори для важелів.

У роботі [13], для знаходження положення полюса повороту, автор використовує векторне рівняння $V + \omega \times R = 0$ та знаходить дві координати положення полюса повороту:

абсцису $R_x = -\frac{V_y}{\omega_z}$ і ординату $R_y = \frac{V_x}{\omega_z}$. У загальному випадку, за наявності бокової і

поздовжньої швидкості, полюс повороту розташовується не в діаметральній площині судна, як вважалося раніше, а в площині OX_1Y_1 , паралельній палубі судна. В усталеному русі положення полюса повороту, що визначається абсцисою і ординатою, співпадає з центром циркуляції.

Метою статті [14] є формулювання правильних визначень, дослідження теоретичного аспекту полюса повороту та його застосування для практичного виконання базових і спеціальних маневрів. Вкладом авторів статті у розвиток теорії полюса повороту є дослідження поведінки полюса повороту для плоского руху судна, за наявності поздовжньої, бокової і кутової швидкості ривка. Автори вводять три центри: центр Е планарного обертання, центр S обертання судна і полюс повороту Р та розглядають положення цих центрів для різних варіантів обертання: чистий обертальний рух (Yaw only), боковий та обертальний рух (Sway+Yaw), поздовжній та обертальний рух (Surge+Yaw), поздовжній, боковий та обертальний рух (Surge+Sway+Yaw). У матеріалах першої та другої [15] статті положення полюса повороту розраховується відносно центру ваги.

Залежність плеча бокової гідродинамічної сили (положення центру бокового гідродинамічного опору) від кута дрейфу наведена у підручнику [16]. Дана залежність має

вигляд $\bar{l}_R = 0,5 + \frac{l_{ЦБО}}{L} - \frac{\beta}{180}$, де $\bar{l}_R = \frac{l_R}{L}$ – відносне плече бокової гідродинамічної сили,

β – кут дрейфу, $l_{ЦБО}$ – зміщення центру бокового опору відносно центру ваги при $\beta = 90^\circ$,

L – довжина судна. Як видно із наведеної формули, залежність відносного плеча бокової гідродинамічної сили від кута дрейфу має лінійний характер і змінюється у межах $|\beta| \leq 0,5$.

У керівництві [17], розділ 5, розглянуті властивості полюса повороту, центру бокового опору (Neutral Point) та центру дрейфу (Center of Drift). Наведені дані ґрунтуються в основному на роботі Кав'є [12], з невеликими доповненнями.

Розрахунок гідродинамічних сил та моментів наведено у роботі [18]. На основі відомих експериментальних даних, за допомогою багатофакторного квазілінійного (лінійного за коефіцієнтами) регресійного аналізу, отримані вирази для констант поліноміальних моделей гідродинамічних сил і моменту на корпусі судна. Як фактори (регресори) взяті різні безрозмірні відношення геометричних параметрів судна, таких як довжина, ширина, осадка, коефіцієнт повноти. При виборі регресійних моделей оцінювалися значення нормованого R-квадрату та стандартних помилок.

У статті [19] розглянута задача статичної постановки судна з непрямоїними обводами корпусу на хвилю. Отримані залежності згинальних моментів і перерізуючих сил від частоти і амплітуди зустрічного хвилювання. Проведено аналіз впливу непрямоїності обводів корпусу на величини згинальних моментів і перерізуючих сил.

Проектування та оптимізація форми корпусу судна, з метою мінімізації опору та забезпечення інших проєктних вимог, є добре відомою проблемою теорії та проектування корабля. Запропонований у роботі [20] метод проектування та оптимізації форми корпусу використовує CFD аналіз для оцінки опору при систематичних перетвореннях поверхні корпусу. Кожна окрема трансформація відповідає новому варіанту форми корпусу з перетвореною ділянкою поверхні. Усі варіанти, що підготовлені на основі початкової форми корпусу, належать до першого кроку оптимізаційного процесу. Вони використовуються у CFD розрахунках для оцінки змін опору у спокійній воді. У результаті, може бути отримана оптимальна форма по шпангоутах, що виражає оптимальний поздовжній розподіл постійного об'єму корпусу та відповідає оптимізованій формі поверхні корпусу. Даний метод був застосований до носових частин двох суден, включаючи добре відому форму корпусу KCS. Отримані результати оптимізації в умовах спокійної води були додатково оцінені на хвилюванні.

У статті [21] розглянуто обґрунтований вибір розмірів рибальського судна з великим коефіцієнтом повноти. Для вирішення поставленого завдання розроблено математичний апарат, до якого увійшли рівняння проектування, у тому числі рівняння плавучості, мас, місткості, коефіцієнта повноти ватерлінії, стійкості, потужності, відносного подовження, коефіцієнта поздовжньої повноти, а також граничні умови та розрахунок економічних показників. Ключовим показником економічної рентабельності проєкту було визначено ефективність капіталовкладень. Для пошуку найбільш ефективного судна виконано варіативний розрахунок – розв'язання системи рівнянь із варіацією деяких вихідних даних. За результатами варіативного розрахунку визначено найбільш вдалі поєднання основних характеристик судна, що забезпечують найкращі економічні показники.

У статті [22] досліджувалося оцінювання маневреності високошвидкісних суден на ранніх стадіях їх проектування. Раніше для цього використовувалися експериментальні, аналітичні та емпіричні методи. У наш час чисельні методи також застосовуються, зважаючи на їх точність і невеликий час обчислення. У роботі представлено гібридний чисельно – теоретичний метод для обчислення гідродинамічних коефіцієнтів із використанням CFD моделювання на основі рівнянь RANS. Комбінованим методом розраховано лінійні та нелінійні гідродинамічні коефіцієнти корпусу судна. Проведено порівняння результатів моделювання із розрахованими напівемпіричним методом Левандовського.

Підсумовуючи, слід зазначити, що останні уявлення про положення центру обертання, центру бокового опору та полюса повороту є наступними:

1. Положення центру обертання зміщується у напрямку руху судна [10].
2. COLR [12] / Neutral Point [17] є точкою опори для важелів.

3. Початкове положення COLR/ Neutral Point визначається положенням центру ваги та положенням центру площі підводної поверхні.

4. Положення COLR/Neutral Point залежить від диференту та поздовжньої швидкості судна.

5. Центр бокового опору (Centre of Drift) є точка, куди прикладені результуючі усіх сил: зовнішніх сил буксира, вітру тощо, сила стерна, гідродинамічна сила опору [17].

6. Судно не обертається навколо центру ваги [17].

7. Положення полюса повороту визначається абсцисою і ординатою та відраховується від центру ваги судна [13].

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є проведення критичного аналізу спрощених уявлень на процеси повороту судна та пояснення неочевидних ефектів у поведінці судна. Задачами дослідження є: аналіз літературних джерел та формування списку останніх уявлень про полюс повороту, центр бокового опору і центр обертання; спростування помилкових уявлень, на основі повної математичної моделі лінійного і кутового руху судна, як еталону, положень теоретичної механіки та гідродинаміки; формулювання висновків.

Основна частина. Нижче детальніше розглядаються помилкові уявлення про процеси обертання судна. Спочатку наводяться авторські цитати, а потім їх спростування. Надалі, автори даної статті використовують позначення центру бокового гідродинамічного опору, як CoLR, у який прикладена результуюча бокова гідродинамічна сила, та позначення COLR [12], положення якого визначено між центром ваги і центром бокового гідродинамічного опору.

Уявлення 1. «As long as the ship develops no headway or sternway, the result of the tugs' effort is sheer lateral motion of the ship. However, as soon as the ship starts moving through the water, ahead or astern, we see that a swing develops... We can simply say that head motion brings the pivot point forward which shortens the distance of the point of impact of the forward tug to the pivot point and consequently reduces the effective leverage of the forward tug. At the same time, the distance of the point of impact of the after tug to the pivot point increases which in turn increases the effective leverage of the after tug» [10].

Третє рівняння системи (2), за відсутності кутових швидкостей крену $\omega_x = 0$ і диференту $\omega_y = 0$, матиме вигляд

$$(I_z + \lambda_{66}) \frac{\partial \omega_z}{\partial t} = (\lambda_{11} - \lambda_{22}) V_x V_y + \sum_{j=1}^k M_{zj}. \quad (3)$$

Із рівняння (3) видно, що за наявності поздовжньої та бокової швидкості руху (як у описаному вище експерименті) з'являється обертаючий момент $M_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22}) V_x V_y$.

Оцінка величини моменту. Приєднані маси води $\lambda_{11}, \lambda_{22}$ та приєднаний момент інерції води λ_{66} можна розрахувати за формулами $\lambda_{11} = \frac{T}{2L} m$, $\lambda_{22} = \frac{2T}{B} \left(1 - \frac{B}{2L}\right) m$,

$\lambda_{66} = \frac{2T}{B} \left(1 - 1.6 \frac{B}{L}\right) I_z$ де m – маса судна, I_z – момент інерції судна, L – довжина судна,

B – ширина судна, T – осадка судна. Наприклад, для судна «Сормовський» $m = 4.514e^6$ кг, $L = 119.2$ м, $B = 13.4$ м, $T = 3.5$ м $I_z = \frac{m}{12} (L^2 + B^2) = \frac{4.514e^6}{12} (119.2^2 + 13.4^2) = 5417e^6$ [кгм²],

$\lambda_{11} = \frac{3.5}{2 \times 119.2} 4.514e^6 = 0.066e^6$ [кг], $\lambda_{22} = \frac{2 \times 3.5}{13.4} \left(1 - \frac{13.4}{2 \times 119.2}\right) 4.514e^6 = 2.23e^6$ [кг],

$\lambda_{66} = \frac{2 \times 3.5}{13.4} \left(1 - 1.6 \frac{13.4}{119.2}\right) 5417e^6 = 2329e^6$ [кг]. Для поздовжньої швидкості

$V_x = 2 \text{ м/с}$, бокової швидкості $V_y = 1 \text{ м/с}$, величина моменту становить $M_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_x V_y = (0.066e^6 - 2,23e^6) \times 1 \times 2 = -4.32e^6 [\text{нм}]$.

Другою причиною є зміщення центру бокового опору CoLR. На рис 1. наведені системи сил у описаному експерименті [10], за відсутності та наявності поздовжнього руху.

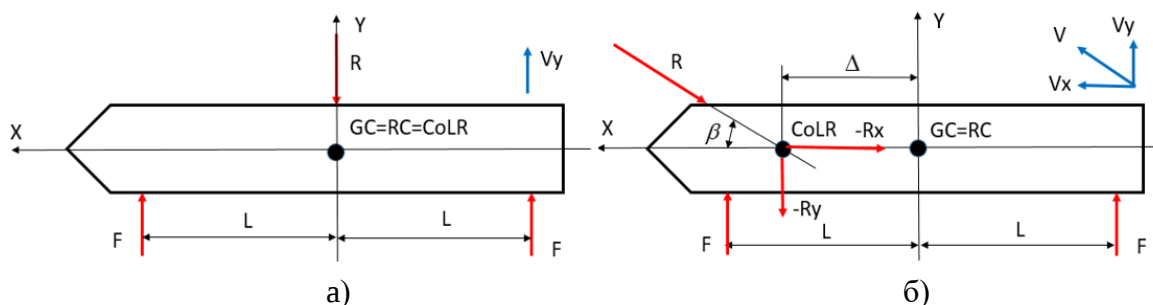


Рисунок 1 – Система сил за відсутності та наявності поздовжнього руху

В усталеному стані, за відсутності поздовжнього руху, рис 1 а), сили буксирів F урівноважуються силою гідродинамічного опору R , прикладеною до CoLR, який співпадає з центром ваги GC. Моменти сил від буксирів також урівноважені, тому судно рухається лагом, без обертання.

За наявності бокового і поздовжнього руху, рис. 1 б), виникає кут дрейфу β між вектором швидкості судна і діаметральною площиною. Результируюча сила гідродинамічного опору діє під кутом β до діаметральної площини, а її складові $-R_x$ та $-R_y$ діють відповідно вздовж та перпендикулярно до діаметральної площини. Сила $-R_x$ не створює обертального моменту, тому, що її плече відносно GC дорівнює нулю, а бокова сила $-R_y$ створює момент $M_2 = -R_y \Delta$, де Δ – плече бокової гідродинамічної сили до центру обертання (центру ваги). У підручнику [16] наведена формула визначення відносного плеча бокової гідродинамічної сили

$$\bar{l}_R = 0,5 + \frac{l_{\text{ЦБО}}}{L} - \frac{\beta}{180}, \quad (4)$$

де β – кут дрейфу у градусах, $l_{\text{ЦБО}}$ – зміщення центру бокового опору відносно центру обертання для $\beta = 90^\circ$, $\Delta = \bar{l}_R L$.

Для розглянутого вище прикладу $V_x = 2 \text{ м/с}$, $V_y = 1 \text{ м/с}$,

$$\beta = \arctan\left(\frac{V_y}{V_x}\right) = \arctan\left(\frac{1}{2}\right) = 27^\circ, \quad \bar{l}_R = 0,5 - \frac{27}{180} = 0.35, \quad \Delta = \bar{l}_R L = 0,35 \times 119,2 = 41,72 \text{ м}.$$

Для усталеного руху $R_y = C_y \rho \frac{V_y^2}{2} L T$, де $C_y = \pi \lambda \nu \frac{\beta}{2}$ – коефіцієнт бокового гідродинамічного опору корпусу, $\lambda = \frac{L}{B}$ – видовження корпусу, $\nu = 0.25$ – характеристика корпусу.

$$C_y = \pi \lambda \nu \frac{\beta}{2} = 3.14 \times \frac{119.2}{13.4} \times 0.25 \times \frac{1}{2} \times \frac{27}{57.3} = 1.65,$$

$$R_y = C_y \rho \frac{V_y^2}{2} L T = 1.65 \times 1024 \times \frac{1^2}{2} \times 119.2 \times 3.5 = 0.35e^6 [H], \quad M_2 = -0.35e^6 \times 41.72 = -14.6e^6 [H \cdot м]$$

Моменти M_1 та M_2 одного знаку, їх сума дорівнює

$$M_1 + M_2 = -4.32e^6 - 14.6e^6 = -18.92e^6 [H \cdot m].$$

Сумарний момент створює кутове прискорення

$$\frac{\partial \omega_z}{\partial t} = \frac{M_1 + M_2}{(I_z + \lambda_{66})} = -\frac{18.92e^6}{5417e^6 + 2329e^6} = -0.0024 [рад/с^2] = -0.14 [зр/с^2].$$

Рухаючись з таким прискоренням, судно за $t=10c$ повернеться на кут $\varphi = \frac{\partial \omega_z}{\partial t} t^2 = -0.14 \times 100 = 14.0 [зр]$.

Як видно із вищенаведеного, причиною обертання судна є поява двох моментів: $M_1 = (\lambda_{11} - \lambda_{22})V_x V_y$ та $M_2 = -R_y \Delta$, а не зміщення центру обертання, який залишається у центрі ваги судна.

Уявлення 2. «At a given moment the COLR of a vessel is that point where, if you apply an «effective» lateral force no rotation (if the vessel has a steady heading) will occur. Acting on this point, lateral force has no arm lever, therefore no turning moment, it only pushes the vessel sideways» [12]. «A transverse force, exerted on the neutral line, moves the ship sideways in the direction of the force without any rotation» [17].

На рис. 2 зображено випадок прикладання бокової сили F у центр бокового опору CoLR.

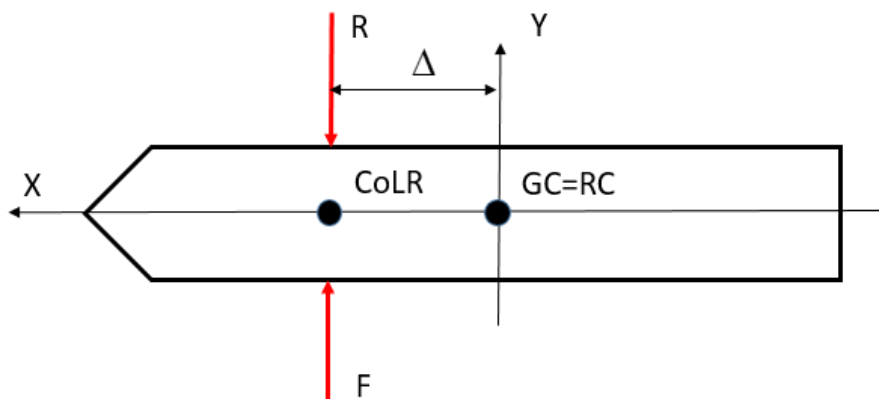


Рисунок 2 – Прикладання бокової сили до CoLR

Автори робіт [12] та [17], очевидно, мають на увазі положення теоретичної механіки, що сила, яка проходить через центр обертання, не створює обертаючого моменту, а значить центр бокового опору CoLR є центром обертання. Насправді бокова сила F , прикладена до CoLR, не створює обертального моменту тому, що в усталеному русі (if the vessel has a steady heading) сила гідродинамічного опору R дорівнює прикладеній силі F і протилежно направлена, $R = -F$. Бокова сила F та сила гідродинамічного опору R прикладені в одну точку CoLR, мають рівні плечі Δ до центру ваги, а отже, і моменти від цих сил відносно центру ваги рівні, але протилежно направлені, $F\Delta - R\Delta = 0$. Отже, бокова сила, прикладена у центр бокового опору CoLR не створює обертального моменту не тому, що CoLR є центром обертання, а тому, що сума моментів прикладеної сили і сили гідродинамічного опору відносно центру ваги дорівнює нулю.

Уявлення 3. «The starting point of the COLR is a point between the centre of gravity of the ship and the centre of underwater surface area, when this two do not coincide» [12]. «If ship dead in the water the Neutral point is close to the centre of gravity» [17].

Під терміном «початкове положення» автори, очевидно, мали на увазі відсутність диференту і поздовжньої швидкості. У цьому випадку центр бокового опору CoLR, за визначенням, повинен знаходитись у центрі підводної поверхні корпусу судна, незалежно від положення центру ваги.

Уявлення 4. «The position of the COLR depends on the centre of gravity, the centre of the underwater surface area (hull shape and trim), the pressure fields around the hull» [12]. The Neutral point is a physical point. Its position depends on the position of the centre of gravity, the centre of buoyancy, the centre of the underwater area (shape of the hull, trim) and of the pressure field around the hull [17].

Положення CoLR, як центру бокового гідродинамічного опору, залежить від положення центру підводної поверхні (визначається формою і диферентом), поля тиску навколо судна і кута дрейфу. Положення CoLR, як центру прикладання бокової гідродинамічної сили, залежить від положення центру ваги лише через диферент (але диферент вже враховано).

Залежність положення плеча бокової гідродинамічної сили (CoLR) від кута дрейфу наведена вище, формула (4). На рис. 3 зображено графік залежності (4). При зміні кута дрейфу в діапазоні $0^\circ \leq |\beta| \leq 180^\circ$, відносне плече бокової гідродинамічної сили (положення COLR) змінюється в межах $-0,5 \leq l_R \leq 0,5$. Вплив кута дрейфу на положення COLR є найсуттєвішим фактором із названих. Саме він дозволяє пояснити «віслючий» ефект. На рис. 3 показано діапазон положень ЦБО для малих кутів дрейфу $0^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$. Якщо сила буксира F буде прикладена лівіше положення ЦБО, як на рис. 3, то в усталеному русі $R = F$, а момент відносно центру ваги від сили опору R буде більшим моменту від сили буксира і судно почне повертатися назустріч прикладеній силі.

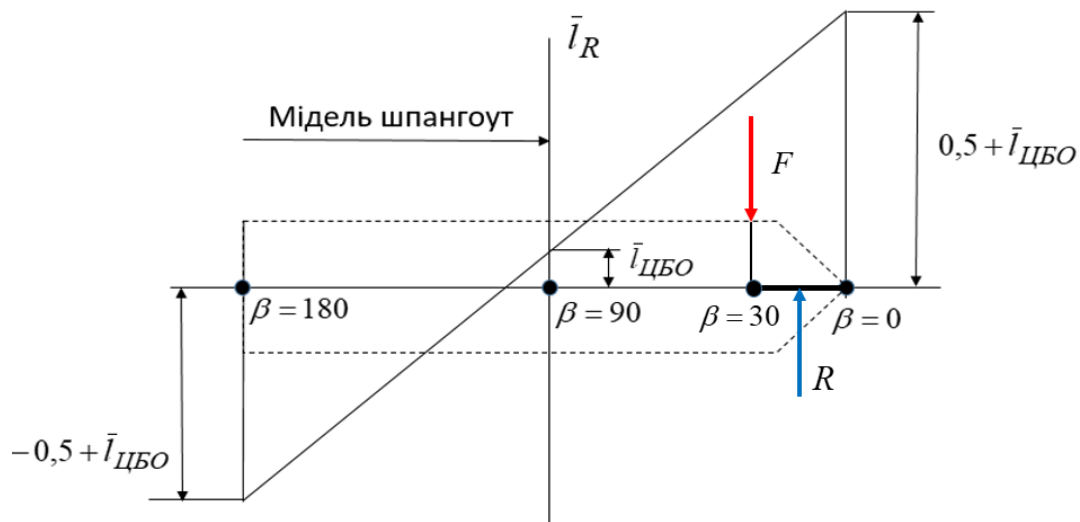


Рисунок 3 – Залежність плеча бокової гідродинамічної сили від кута дрейфу

Уявлення 5. «The Centre of Drift (D) is the point where the resultant of all hydrodynamic forces is acting: external forces: tugs, wind, etc., rudder force, underwater resistance UWR, lift and drag as a function of speed and drift angle» [17].

Згідно з положеннями гідродинаміки, у центр бокового опору прикладена лише результуюча гідродинамічна сила (underwater resistance). Зовнішня сила буксира прикладена у точці контакту буксира із корпусом судна. Зовнішня сила вітру прикладена у центрі парусності судна. Сила керма прикладена у центрі керма тощо. При перенесенні даних сил у Centre of Drift (центр бокового опору) потрібно додатково враховувати моменти, які вони створюють.

Уявлення 6. «A ship does not turn around its centre of gravity» [17].

Автори керівництва по судноводінню, очевидно, мають на увазі, що судно обертається навколо полюсу повороту, а не навколо центру ваги. Насправді обертання судна навколо полюсу повороту видиме лише для усталеного руху судна і є приватним випадком загального руху, який описується системою диференціальних рівнянь (1) та (2). Диференціальні рівняння (1) та (2) описують рух центру ваги судна і обертання судна навколо центру ваги.

Дані рівняння з часів Ейлера використовувалися для моделювання руху різних об'єктів і пройшли перевірку практикою. Отже, обертання судна навколо полюсу повороту є приватним випадком бокового та обертального (по рисканню) руху судна навколо центру ваги, видиме за умови усталеного руху.

Основні результати та їх обговорення. Проведено критичний аналіз спрощених уявлень на процеси повороту судна та наведені пояснення неочевидних ефектів у поведінці судна. Спростовано помилкові уявлення щодо полюса повороту, центру бокового опору і центру обертання. Отриманий результат пояснюється використанням повної математичної моделі (системи диференціальних рівнянь лінійного і кутового руху судна) як, наукового підходу, положень теоретичної механіки та гідродинаміки. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють пояснити незвичні ефекти у поведінці судна лише зміщенням центру бокового опору, який є центром прикладання бокової гідродинамічної сили і не має ніякого відношення до центру обертання (центру прикладання важелів сил). Положення центру бокового гідродинамічного опору залежить лише від диференту, поздовжньої швидкості судна і кута дрейфу. Центром обертання судна є центр ваги. Критичний аналіз існуючих уявлень проведено для правильного розуміння судноводіями поведінки судна, що дозволить уникнути прийняття помилкових управлінських рішень та підвищити безпеку судноводіння. Отримані результати є відтворюваними і можуть застосовуватися при розробці керівництв для судноводіїв.

Висновки. Проведено огляд літературних джерел, присвячених дослідженню поведінки особливих точок судна: центру обертання, центру бокового опору та полюсу повороту. Встановлено, що найближчі технічні рішення містяться в роботах Н. Ноуер, Ch. Tzeng, A. G. Chase, H. Cauvier, S. G. Seo, керівництву по судноводінню 2014 року, порт Ревель. На жаль, у деяких публікаціях і навіть керівництвах по управлінню судном, використовуються уявлення, які не вірно трактують вплив особливих точок на поведінку судна. Проведено критичний аналіз таких уявлень на основі повної математичної моделі (системи динамічних рівнянь лінійного та кутового руху судна) як еталону, наукового підходу, положень теоретичної механіки та гідродинаміки. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що дозволяють пояснити незвичну поведінку судна лише зміщенням центру бокового опору, який є центром прикладання бокової гідродинамічної сили і не має ніякого відношення до центру обертання (центру прикладання важелів сил).

Теоретичне значення отриманих результатів полягає у: поясненні поведінки судна, включаючи незвичні поведінкові ефекти, лише зміщенням центру бокового опору, виявленні хибних уявлень про поведінку судна, які не узгоджуються з математичною моделлю (динамічними рівняннями поздовжнього та кутового руху судна), положеннями теоретичної механіки та гідродинаміки.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання для розробки керівництв по судноводінню, наданні судноводіям правильного розуміння поведінки судна, що дозволить уникнути прийняття хибних управлінських рішень та підвищити безпеку судноплавства.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути пов'язані з проведенням критичного аналізу інших хибних уявлень про поведінку судна, які закладаються в керівництва для судноводіїв. Невірне розуміння процесів поведінки судна є одним із найнебезпечніших факторів, який може сприяти підвищенню ризиків ручного керування. Подальше виявлення хибних уявлень про поведінку судна, їх спростування на основі наукового підходу, законів теоретичної механіки, гідродинаміки, спираючись на повну математичну модель, дозволить суттєво зменшити такі ризики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Louda P., Marasanov V., Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A. The Theory of Similarity and Analysis of Dimensions for Determining the State of Operation of Structures Under Difficult Loading Conditions. *Materials*, 2022, 15(3), 1191 <https://doi.org/10.3390/ma15031191>. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/1191>.
2. Babichev S., Sharko O., Sharko A., Mikhalyov O. Soft Filtering of Acoustic Emission Signals Based on the Complex Use of Huang Transform and Wavelet Analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Springer, 1020, pp. 3–19 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1>.
3. Louda P., Sharko O., Stepanchikov D., Sharko A. Experimental and Theoretical Study of Plastic Deformation of Epoxy Coatings on Metal Substrates Using the Acoustic Emission Method, *Materials*, 2022, 15(11), 3791. <https://doi.org/10.3390/ma15031191> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9181548/>.
4. Zinchenko S., Kyrychenko K., Grosheva O., Nosov P., Popovych I., Mamenko P. Automatic reset of kinetic energy in case of inevitable collision of ships, *IEEE Xplore*, pp. 496–500, 2023 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland, 2023. <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545>. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10275545>.
5. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Mateichuk V., Nosov P., Popovych I., Perederyi V. Automatic Prevention of the Vessel's Parametric Rolling on the Wave, *CEUR-WS.org*, 2024, Vol. 3668, pp. 235–246, (COLINS-2024). <https://ceur-ws.org/Vol-3668/paper16.pdf>.
6. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Popovych I., Nosov P., Onyshko D., Kalinichenko Ye. Reconfiguration of Redundant Structures of Ship Actuators Using Zero Motion Method, *IEEE Xplore*. ACIT-2025, Šibenik, CROATIA, 17–19 September 2025. <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185810>.
7. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Kobets V., Kyrychenko K. Intelligent system for reconfiguring the redundant structure of ship actuators without disturbance, *CEUR*, Vol 3983, pp. 115–126.
8. Zinchenko S., Kobets V., Tovstokoryi O., Kyrychenko K., Nosov P., Popovych I. Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel, *CEUR-WS.org*, Vol. 3513, pp. 130–140, 2023 (ICST-2023). <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf>.
9. Navi-Trainer Professional 6. Ship Motion Mathematical Modeling Description, version 6.0, Wärtsilä Voyage Oy, Date of issue: February 2024.
10. Hooyer H. H. Behavior and Handling of Ships. Cornell Maritime Press, 1983.
11. Tzeng Ch. Analysys of the pivot point for a turning ship, *Journal of marine science and technology*, 1998, 6(1), pp. 39–44. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf>.
12. Cauvier H. The Pivot Point. The PILOT, *The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association*, 2008, pp. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
13. Artyszuk J. Pivot point in ship manoeuvring. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*, 2010, 20(92):13-24.
14. Seo S. G. The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring. *Proceedings of IMLA*, 2011, Vol. 1, Issue 29, pp. 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring.
15. Seo S. G. Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2016, Vol. 10, Issue 4, pp. 605–612. <https://doi.org/10.12716/1001.10.04.09>.
16. Дьомін, С. І., Жуков, Є. М., Кубачов, Н. А. Управління судном: підручник для

ВНЗ // С. І. Дьомін, Є. М. Жуков, Н. А. Кубачов та ін, 1991, 359 с.

17. Port Revel. Shiphandling. Course Manual, 2014.

18. Kryvyi O., Miyusov M., The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi- factor Regression Analysis, *8-th International Maritime Science Conference. IMSC*, Budva, Montenegro, 2019.

19. Бітюков М. А., Герасимов К. Д., Кирилов П. А., Чистяков Р. С., Застосування чисельних методик для оцінки впливу непрямостінності корпусу судна на величину хвильових навантажень, *Праці Криловського державного наукового центру S-I* (1), 98–101, Грудень 2022. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101.

20. Давидов, І., Печенюк, А. Дослідження впливу форми носової частини судна на його опір в умовах тихої воді та хвилювання, *Вісник Одеського національного морського університету*, 2023. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-7-20>.

21. Чуреєв Є. А., Романюта Д. А., Білоусов В. А., Миколаїв І. І., Обґрунтування та вибір основних характеристик малого рибальського судна з великою повнотою корпусу, *Известия КДТУ*, 2022.

22. Begovic E., Panahi S., Rinauro B., Rosano G., Determination of Hydrodynamic Maneuvering Coefficients of a Planing Hull Using CFD with the Aid of SDT, *Progress in Marine Science and Technology*, Vol. 7, 65–77, 2023. <https://doi.org/10.3233/PMST230010>.

23. Zinchenko S., Kalinichenko Ye., Kozachok Yu., Mateichuk V. Influence of hull and cargo contours on lateral force and yaw torque in real – time vessel control systems. *Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy*, 2024, Vol. 2, № 29, p. 24–34. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.024-034>.

REFERENCES

1. Louda, P., Marasanov, V., Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A. (2022). The Theory of Similarity and Analysis of Dimensions for Determining the State of Operation of Structures Under Difficult Loading Conditions, *Materials*, 2022, 15(3), 1191. <https://doi.org/10.3390/ma15031191>. <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/3/1191>.

2. Babichev, S., Sharko, O., Sharko, A., Mikhalyov, O. (2020). Soft Filtering of Acoustic Emission Signals Based on the Complex Use of Huang Transform and Wavelet Analysis. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, 1020, pp. 3–19. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1>.

3. Louda, P., Sharko, O., Stepanchikov, D., Sharko, A. (2022). Experimental and Theoretical Study of Plastic Deformation of Epoxy Coatings on Metal Substrates Using the Acoustic Emission Method, *Materials*, 15(11), 3791. <https://doi.org/10.3390/ma15031191> <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9181548/>.

4. Zinchenko, S., Kyrychenko, K., Grosheva, O., Nosov, P., Popovych, I., Mamenko, P. (2023). Automatic reset of kinetic energy in case of inevitable collision of ships, *IEEE Xplore*, pp. 496–500, 13th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Wrocław, Poland. <https://doi.org/10.1109/ACIT58437.2023.10275545>. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10275545>.

5. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Mateichuk, V., Nosov, P., Popovych, I., Perederyi, V. (2024). Automatic Prevention of the Vessel's Parametric Rolling on the Wave, *CEUR-WS.org*, Vol. 3668, pp. 235–246. (COLINS-2024). <https://ceur-ws.org/Vol-3668/paper16.pdf>.

6. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Popovych, I., Nosov, P., Onyshko, D., Kalinichenko, Ye. (2025). Reconfiguration of Redundant Structures of Ship Actuators Using Zero Motion Method, *IEEE Xplore*. ACIT-2025, Šibenik, CROATIA, 17–19 September 2025. <https://doi.org/10.1109/ACIT65614.2025.11185810>.

7. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Kobets, V., Kyrychenko, K. (2025). Intelligent system for reconfiguring the redundant structure of ship actuators without disturbance, CEUR, Vol 3983, pp. 115–126.
8. Zinchenko, S., Kobets, V., Tovstokoryi, O., Kyrychenko, K., Nosov, P., Popovych, I. (2023). Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel, CEUR-WS.org, Vol. 3513, pp. 130–140, (ICST-2023). <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf>.
9. Navi-Trainer Professional 6. Ship Motion Mathematical Modeling Description, version 6.0, Wärtsilä Voyage Oy, Date of issue: February 2024.
10. Hooyer, H. H. (1983). Behavior and Handling of Ships. Cornell Maritime Press.
11. Tzeng, Ch. (1998). Analysis of the pivot point for a turning ship. Journal of marine science and technology 6(1), pp. 39–44. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf>.
12. Cauvier, H. The Pivot Point. (2008). The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. p. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
13. Artyszuk, J. (2010). Pivot point in ship manoeuvring. Scientific Journals Maritime University of Szczecin 20(92):13-24.
14. Seo, S. G. (2011). The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring. Proceedings of IMLA. Vol. 1, Issue 29, pp. 271–280. https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring.
15. Seo, S. G. (2016). Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, Vol.10, Issue 4, pp. 605–612. <https://doi.org/12.12716/1001.10.04.09>.
16. Demin, S. I., Zhukov, E. M., Kubachev, N. A. (1991). Upravlenie sudnom: uchebnik dlya VUZov, 359 s.
17. Port Revel (2014). Shiphandling. Course Manual.
18. Kryvyi, O., Miyusov, M. (2019). The Creation of Polynomial Models of Hydrodynamic Forces on the Hull of the Ship with the help of Multi- factor Regression Analysis, 8-th International Maritime Science Conference. IMSC, Budva, Montenegro.
19. Bitiukov, M. A., Herasymov, K. D., Kyrylov, P. A., Chystiakov, R. S. (2023). Zastosuvannya chyselnykh metodyk dlia otsinky vplyvu nepriamostinnosti korpusu sudna na velychynu khvylovykh navantazhen, Pratsi Krylovskoho derzhavnoho naukovoho tsentru S-I (1), 98–101, Hruden 2022. <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2022-1-S-I-98-101>.
20. Davydov, I., Pecheniuk, A. (2023). Doslidzhennia vplyvu formy nosovoi chastyny sudna na yoho opir v umovakh tykhoi vodi ta khvyliuvannia, Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu. D <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2023-3-7-20>.
21. Chureev, E. A., Romanyuta, D. A., Belousov, V. A., Nikolaev, I. I. (2022). Obosnovanie i vybor osnovnykh kharakteristik malogo rybolovnogo sudna s bol'shoj polnotoj korpusa, Izvestiya KGTU. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-67-71-86>.
22. Begovic, E., Panahi, S., Rinauro, B., Rosano, G. (2023). Determination of Hydrodynamic Maneuvering Coefficients of a Planing Hull Using CFD with the Aid of SDT, Progress in Marine Science and Technology, Vol. 7, 65–77, 2023. <https://doi.org/10.3233/PMST230010>.
23. Zinchenko, S., Kalinichenko, Ye., Kozachok Yu., Mateichuk V. (2024). Influence of hull and cargo contours on lateral force and yaw torque in real - time vessel control systems. Scientific Bulletin Kherson State Maritime Academy, Vol 2, № 29, p. 24–34. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2024.2.29.024-034>.

Zinchenko S. M., Nosov P. S. CRITICAL ANALYSIS OF SIMPLIFIED VIEWS OF SHIP TURNING PROCESSES

Exact models in the form of a system of differential equations can be processed by the on-board computer of the control system. However, on most ships there is no such specialized computer, and therefore there is a need to evaluate the behavior of the ship using simplified representations. Simplified representations began to be developed to explain unusual behavioral effects observed on board the ship, such as the apparent rotation around the pivot point, the rotation of a ship pushed by two tugboats with a time lag, when longitudinal speed appears, the "donkey" effect, etc. A prerequisite for constructing simplified representations is the steady motion of the ship. Thus, the apparent pivot point can be observed only in a steady circulation. During transient processes, it moves quickly, without being fixed at one point. Simplified representations should not only explain unusual behavioral effects, but also be consistent with the basic provisions of theoretical mechanics. Unfortunately, some publications and even manuals on ship control use concepts that do not correctly interpret the behavior of the ship. Such concepts should not only explain the non-obvious effects of the ship's behavior, but also be consistent with the full mathematical model of the ship's motion and with the basic provisions of theoretical mechanics and hydrodynamics. The object of research is the ship's turning processes. The paper critically analyzes simplified concepts of the ship's turning processes and provides explanations of non-obvious effects in the ship's behavior. Misconceptions about the pivot point, the center of lateral resistance, and the center of rotation are refuted. The results obtained are explained using a mathematical model (a system of differential equations of linear and angular motion of the ship) as a reference, as well as the scientific approach, and provisions of theoretical mechanics and hydrodynamics. A critical analysis of existing concepts was carried out to ensure the correct understanding of the ship's behavior by shipowners, which will allow them to avoid making erroneous management decisions and to increase the safety of navigation. The results obtained are reproducible and can be used both in the development of manuals for navigators and in software for automatic control modules.

Key words: navigation safety; pivot point; center of lateral resistance; center of rotation; donkey effect.

© Зінченко С. М., Носов П. С.

Статтю прийнято до редакції 05.12.2025