

УДК 004.942:656.61.052

РОЗРАХУНОК ВЕЛИЧИНИ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ОБЕРТАННЯ СУДНА

Товстокорий О. М., к.т.н., завідувач кафедри управління судном, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: otovstokory@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3048-0028;

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

Нагрибельний Я. А., д.пед.н., професор, декан факультету судноводіння, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: yar1507@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3266-5798;

Тимофєєв К. В., к.т.н., доцент, доцент кафедри експлуатації судового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, Україна, e-mail: kvtymofeev2013@gmail.com, ORCID: 0000-0002-8668-6159.

Просте відхилення стерна призводить до появи кутової швидкості обертання судна навколо центру обертання і одночасно бокової швидкості руху центру обертання. Такий складний рух судна важко усвідомити судноводієві та прийняти правильне рішення. Разом з тим, боковий та обертальний рухи можна замінити одним «чистим» обертанням судна навколо іншої точки – полюсу повороту. Знання положення центру обертання і полюсу повороту дозволяє зменшити область маневрування, що особливо важливо при маневруванні у стиснених водах. Метою роботи є визначення зміщення центру обертання відносно центру ваги/міделі шпангоуту на максимальній швидкості циркуляції судна. Дана мета досягається за рахунок порівняння положення полюсу повороту на стоячому судні, визначеному теоретично, і положення полюсу повороту на циркулюючому з максимальною швидкістю судні, визначеному під час проведення експерименту на навігаційному тренажері. Так як положення полюсу повороту залежить лише від відносного плеча (між кермом і центром ваги/міделі шпангоутом) прикладання бокової сили, яке у обох випадках однакове, то виявлена різниця і буде зміщенням центру обертання. Результати проведених експериментів та виконаних розрахунків показують, що положення полюсу повороту, розраховане для стоячого судна, відрізняється від положення полюсу повороту циркулюючого з максимальною швидкістю судна на величину $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$. На думку авторів, виявлена різниця пояснюється зміщенням центру обертання судна відносно центру ваги/міделі шпангоуту при наявності поздовжньої швидкості. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у експериментальному доведенні ефекту зміщення полюсу повороту та встановленні причини – зміщення центру обертання, у залежності від швидкості судна. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні ефекту зміщення центру обертання для зменшення області маневрування, що особливо важливо у стиснених водах.

Ключові слова: зміщення центру обертання; положення полюсу повороту; циркуляція судна; маневрування у стиснених водах.

DOI: 10.33815/2313-4763.2023.1-2.26-27.044-055

Вступ. Центр обертання і полюс повороту – дві особливі точки, які мають важливе значення при маневруванні судна. Відносно центру обертання судно має найменший момент інерції і тому обертається навколо нього. За наявності бокової швидкості, судно рухається лагом і обертається навколо центру обертання одночасно. Цей складний рух можна замінити «чистим» обертанням навколо іншої точки – полюсу повороту. Полюс повороту відраховується від центру обертання, який, у свою чергу, може зміщуватися відносно центру ваги/міделі шпангоуту, у залежності від швидкості судна. Знання положення центру обертання і полюсу повороту дозволить зменшити область маневрування судна, що є особливо важливим при маневруванні у стиснених водах. Тому дослідження, яким присвячена дана стаття, вирішують актуальну науково-технічну проблему.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Вивчення поведінки центру обертання і полюсу повороту раніше розглядалося багатьма авторами.

У книзі [1], для спрощеної моделі судна, авторами отримані аналітичні залежності положення полюсу повороту, як уявної точки обертання судна, від плеча прикладання бокової сили та побудовані графіки. У отриманих результатах плече прикладання бокової

сили та відповідне йому положення полюсу повороту відраховувалися від мідель шпангоуту, а не від центру обертання.

У роботі [2], на прикладі виходу судна із доку заднім ходом, автор показав, що використання існуючих на той час рекомендацій по керуванню судном призводить до навалу судна на стінку дока. Вважалося, що судно обертається навколо центру обертання, який при русі заднім ходом зміщується назад. Насправді ж, судно оберталося навколо полюсу повороту, який навпаки був зміщений вперед, що й приводило до навалювання судна на стінку дока. Також автором наведені цікаві міркування щодо центру обертання, який повинен знаходитися між центром тяжіння і центром бокового гідродинамічного опору (COLR), який зміщується у напрямку руху судна. Максимальне зміщення COLR, на думку автора, становить до 10% довжини судна. Автор також підкреслив, що центр обертання і полюс повороту – це два різні центри.

У роботі [3] автор зазначає, що концепція полюсу повороту, для вирішення задач маневрування суден, використовується вже близько 200 років. Проте, до цього часу існують хибні уявлення про полюс повороту, а саме: полюс повороту переміщується у напрямку руху судна; полюс повороту є центром обертання судна; полюс повороту миттєво переміщується; полюс повороту є точкою, відносно якої діють прикладені моменти. Насправді: положення полюсу повороту не залежить від поздовжньої швидкості судна; полюс повороту є уявним центром; полюс повороту переміщується поступово; полюс повороту не є фізичною сутністю. Автор наводить також формули визначення положення полюсу повороту, аналізує схеми обертання судна та наводить приклади використання полюсу повороту для маневрування судном.

Фундаментальні дослідження по керуванню судном наведені у книзі [4], зокрема, у розділі 7.2.4. Pivot Point показано сучасний стан уявлень про полюс повороту та його використання для керування судном.

У статті [5] автор аналізує положення центру обертання у залежності від дії зовнішніх факторів: поздовжнього руху судна, впливу вітру, відхилення керма, інерції обертання, впливу гребного гвинта для переднього і заднього руху судна. Як правило, – пише автор, – на судні, яке не має ходу відносно води, центр обертання знаходиться по інший бік мідель шпангоуту від прикладеної бокової сили (у даному випадку під центром обертання автор, очевидно, має на увазі полюс повороту). Кермо або інша поперечна сила, що діє в кормовій частині судна, утворює центр обертання попереду міделя. На прикладі танкера на рівному кілі у вантажі розглянуто вплив поздовжньої швидкості судна на положення центру обертання. Два буксири однакової потужності знаходяться на однаковій відстані від мідель шпангоуту і штовхають танкер лагом. Поки судно не має ходу ні вперед, ні назад, результатом зусиль буксирів буде чистий поперечний рух судна. Як тільки судно почне рухатись відносно води, виникає розворот судна. Рух судна вперед зміщує центр бокового опору і центр обертання вперед, що призводить до зменшення плеча носового буксира та збільшення плеча кормового буксира відносно центру обертання. Рух судна назад зміщує центр обертання назад, та обертання судна у протилежному напрямку.

У статтях [6, 7] автор перелічує основні положення традиційної теорії полюсу повороту та наводить роботи авторів, починаючи з 2008 р., у яких заперечуються ці положення. Зокрема, наведені та проаналізовані статті: к.д.п. Х. Ков'є (H. Cauvier); доктора Сон-Гі Сео (Seong-Gi Seo), серпень 2011 р. та грудень 2016 р., доктора Сон-Гі Сео (Seong-Gi Seo) і М. Мішу (M. Mishu), жовтень 2011 р.; доктора та к.д.п. П. Бутусіна (P. Butusina), жовтень 2011 р.; професора Те-Гвеон Чон (Tae-Gweon Jeong), липень 2012 р.; Х. Е. Карреньо (J. E. Carreno), грудень 2012 р.; П. Перера (P. Perera), січень 2015 р.; А. Недельку (A. Nedelcu et. al.), січень 2018 р.; доктора К. Бенедикт (K. Benedict), липень 2020 р. Автор зазначає, що на думку згаданих вчених центром фізичного обертання судна є центр бокового гідродинамічного опору, який може зміщуватися у напрямку руху судна.

У роботі [8] розглянуті питання впливу центру ваги, центри обертання та полюсу повороту на точність прогнозування лінійного та кутового руху судна, з метою підвищення безпеки розходження.

У статті [9] автор зазначає, що розуміння основ поведінки полюсу повороту є вкрай важливим для правильного розуміння поведінки судна. Полюс повороту – це уявна точка на судні, яка рухається по круговій траєкторії по периметру кола повороту судна при розвороті. Знання положення точки повороту в ситуації маневрування забезпечує оператора судна інформацією про геометрію руху. Під час циркуляції оператор відчуває комбінований ефект бокового руху від дрейфу і повороту, що створює хибне враження обертального руху навколо видимого центру, який і називається полюсом повороту. Для визначення положення полюсу повороту автором проведено натурний експеримент на судні *Rapatah* з гвинтом правого обертання та фіксованим кроком. Телеграф встановлено у положення «half astern». Для зручності аналізу весь експеримент було поділено на 8 часових інтервалів. Для кожного інтервалу обчислювалося середнє положення полюсу повороту. Експеримент показав, що положення полюсу повороту було на відстані приблизно 17% довжини судна від носа. Наведені фото експерименту.

У статті [10] автор зазначає, що полюс повороту використовується для опису маневреності та керованості суден. Це не справжній центр обертання судна, а видимий. Геометрично полюс повороту можна визначити як точку на круговій траєкторії, навколо якої рухається судно під час циркуляції. З полюсу повороту рух носової та кормової частини судна виглядає як «чисте» обертання. Положення полюсу повороту використовується операторами судна як допоміжний інструмент визначення зовнішніх сил, що діють на судно. Також положення полюсу повороту можна оцінити по розміру області маневрування. Якщо полюс повороту розташований не на мідель шпангоуті, а в носовій або кормовій частині судна, область маневрування збільшиться у чотири рази. Положення полюсу повороту залежить від точки прикладання бокової сили, наприклад, при застосуванні носових та кормових підрулюючих пристроїв, дії буксирів, тощо. Полюс повороту рухається не миттєво, а повільно, у залежності від зміни гідродинамічних сил, що діють на судно. Для судна, що знаходиться у спокої на рівному кілі, положення полюсу повороту співпадає із мідель шпангоутом. Для судна, що рухається вперед на рівному кілі, полюс повороту також зміщується вперед і на максимальній швидкості зміщується на 25% довжини судна вперед від мідель шпангоуту. Для судна, що рухається назад, полюс повороту також зміщується назад і на максимальній швидкості заднього ходу зміщується на 25% довжини судна в корму. На положення полюсу повороту впливають також такі фактори як прискорення, геометрія та швидкість судна, можуть відігравати важливу роль у визначенні положення точок повороту.

У статті [11] розроблено уточнену схему розрахунку положення полюсу повороту, із врахуванням центру обертання, досліджено схему керування із носовим та кормовим підрулюючим пристроєм, знайдено лінії керувань, на яких реалізується заданий рух судна (навколо полюсу повороту, без бокової швидкості, без кутової швидкості), досліджено коефіцієнт розподілу керувань та точки розриву функції, знайдені керування для точок розриву, знайдені оптимальні керування.

У статті [12] розглянуті питання автоматичного керування обертанням одногвинтового конвенційного судна навколо полюсу повороту без дрейфу. Для лінеаризованої моделі судна досліджені можливості двох схем керування – з носовим підрулюючим пристроєм та без носового підрулюючого пристрою. Для кожної схеми отримано зв'язок між керуваннями, які забезпечують рух судна без дрейфу. Отримані результати перевірені на стенді імітаційного моделювання у замкнутому контурі «Імітатор бортового контролеру – Моделі судна навігаційного тренажеру *Navi Trainer 5000*».

У статті [13] розглянуті питання використання концепції полюсу повороту для керування конвенційним одногвинтовим судном. Актуальність задачі полягає в необхідності зменшення площі маневрування одногвинтових конвенційних суден, які мають низьку маневреність, а їх частка в загальній кількості суден перевищує 85%. Недоліком існуючих

підходів до розрахунку положення полюсу повороту було використання спрощеної схеми розрахунку «центр ваги – полюс повороту», яка не враховувала залежність положення полюсу повороту від положення центру обертання. У статті, для конвенційного одногвинтового судна отримано формулу та графіки положення полюсу повороту відносно фіксованої точки на корпусі судна (центру тяжіння/мідель шпангоуту) для уточненої розрахункової схеми «центр ваги – центр обертання» – полюс повороту». Отримані формули та графіки можуть бути використані як при ручному, так і при автоматичному керуванні рухом судна. Для двох розглянутих розрахункових схем проведено математичне моделювання руху конвенційного одногвинтового судна в замкненому контурі «Об’єкт керування – система керування». Результати моделювання показали, що використання уточненої розрахункової схеми дозволяє на 23% точніше оцінити траєкторію судна та необхідну площу маневрування.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є визначення зміщення центру обертання відносно центру ваги/мідель шпангоуту на максимальній швидкості циркуляції судна. Дана мета досягається за рахунок порівняння положення полюсу повороту на стоячому судні, визначеному теоретично, і положення полюсу повороту на циркулюючому з максимальною швидкістю судні, визначеному під час проведення експерименту на навігаційному тренажері. Так як положення полюсу повороту залежить лише від відносного плеча (між кермом і центром ваги/мідель шпангоутом) прикладання бокової сили, яке у обох випадках однакове, то виявлена різниця і буде зміщенням центру обертання.

Основна частина. Для проведення подальших обчислень визначимо зв’язану із судном систему координат (ЗСК). ЗСК розташована у центрі ваги судна, вісь OX_1 ЗСК лежить у діаметральній площині, паралельна палубі і направлена у носову частину судна. Вісь OY_1 перпендикулярна осі OX_1 , паралельна палубі судна і направлена в сторону правого борту. Вісь OZ_1 доповнює систему до «правої».

Визначення положення полюсу повороту на стоячому судні. У роботі [2] авторами знайдена залежність між відносним положенням полюсу повороту \bar{X}_{nn} і відносним плечем бокової сили \bar{X}_p

$$\bar{X}_p = \frac{\frac{1}{6} \bar{X}_{nn}^4 - \frac{1}{4} \bar{X}_{nn}^2 - \frac{1}{32}}{\frac{2}{3} \bar{X}_{nn}^3 + \frac{1}{2} \bar{X}_{nn}} \quad (1)$$

Залежність (1) також представлена у вигляді графіка, рис. 1.

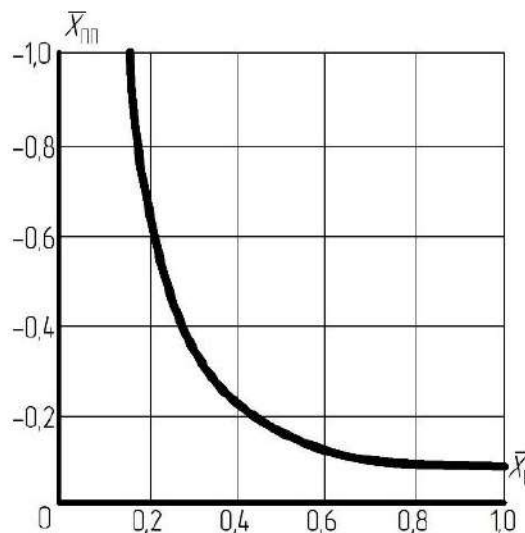


Рисунок 1 – Графік залежності відносного положення полюсу повороту від відносного плеча бокової сили

Користуючись наведеними авторами формулами і графіком, отримуємо, що на стоячому судні, для відносного плеча бокової сили $\bar{X}_p = 0,5$, відносно положення полюсу повороту становить $\bar{X}_{nn} = -0,17$. Для знаходження формул і побудови графіку автори використовували систему координат, розташовану у центрі ваги судна / на мідель шпангоуті, вісь OX_1 якої направлена в сторону корми. У заданій нами системі координат, ці значення відповідно будуть $\bar{X}_p = -0,5$ та $\bar{X}_{nn} = 0,17$.

Розглянемо інший метод визначення взаємозв'язку між точкою прикладання бокової сили і положенням полюсу повороту, оснований на використанні лінеаризованої моделі реального судна. Відомо, що положення абсциси полюсу повороту визначається за формулою:

$$X_{nn} = -\frac{V_y}{\omega_z} \quad (2)$$

Для визначення бокової V_y та кутової ω_z швидкості судна, запишемо лінеаризовану систему бокового та кутового руху судна, до якого прикладена бокова сила F_y на відстані X_p від ЦО

$$\begin{cases} (m + \lambda_{22})\dot{V}_y = F_y - \frac{\partial R_y}{\partial V_y} V_y, \\ (I_z + \lambda_{66})\dot{\omega}_z = F_y X_p - \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z \end{cases} \quad (3)$$

де $m + \lambda_{22}$ – маса судна з приєднаними масами води;

$I_z + \lambda_{66}$ – момент інерції судна з приєднаними масами води у каналі рискання;

$\frac{\partial R_y}{\partial V_y}$ – коефіцієнт чутливості бокового опору корпусу судна до зміни бокової швидкості;

$\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}$ – коефіцієнт чутливості гідродинамічного моменту опору обертанню до зміни кутової швидкості.

Для усталеного руху ($\dot{V}_y = 0, \dot{\omega}_z = 0$), із системи (3) знаходимо:

$$V_y = \frac{F_y}{\left(\frac{\partial R_y}{\partial V_y}\right)}, \quad \omega_z = \frac{F_y X_p}{\left(\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}\right)} \quad (4)$$

Після підстановки усталених значень бокової та кутової швидкості із рівнянь (4) у рівняння (2), отримуємо формулу визначення положення ПП відносно ЦО при прикладанні бокової сили F_y на відстані X_p від центру обертання

$$X_{nn} = -\frac{\left(\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z}\right)}{\left(\frac{\partial R_y}{\partial V_y}\right)} \frac{1}{X_p}, \quad (5)$$

У відносних величинах рівняння (5) матиме вигляд

$$\bar{X}_{nn} = -\frac{1}{L^2} \frac{\left(\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \right)}{\left(\frac{\partial R_y}{\partial V_y} \right)} \frac{1}{\bar{X}_p}, \quad (6)$$

де L – довжина судна.

На рис. 2 наведено графік залежності відносного положення полюсу повороту \bar{X}_{nn} від відносного плеча прикладання бокової сили \bar{X}_p , побудований для судна OSV3-АН. Для зручного порівняння із рис. 1, дані наведені у тій же системі координат, що й на рис. 1.

Значення гідродинамічних коефіцієнтів $\frac{\partial R_y}{\partial V_y} = 25,9e^4$, $\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} = 2.16e^8$, що використовуються у формулі (6), взяті із статті [8].

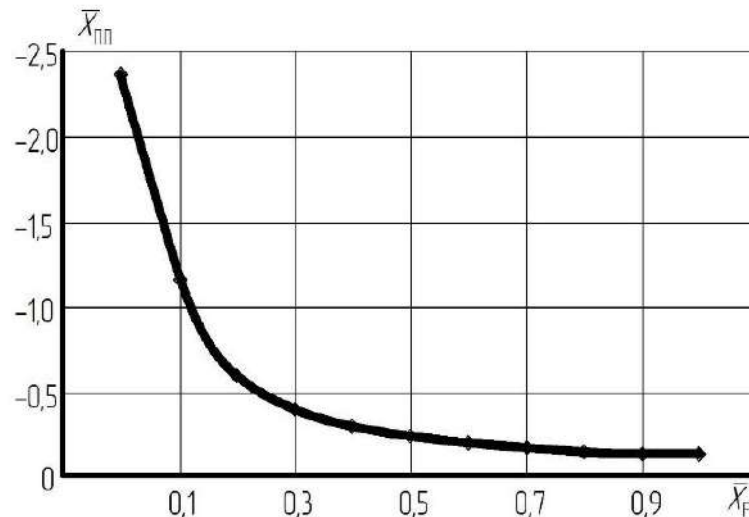


Рисунок 2 – Залежність положення полюсу повороту від плеча бокової сили для судна OSV3-АН

Як видно із результатів обчислення формули (6) та наведеного графіка, для відносного плеча прикладання бокової сили $\bar{X}_p = 0,5$ відносно положення полюсу повороту становить $\bar{X}_{nn} = 0,232$.

Визначення положення полюсу повороту на судні, що рухається. Для визначення положення полюсу повороту на судні, що рухається, було проведено чотири експерименти на навігаційному тренажері Navi Trainer 5000 [13, 14]. Для першого та другого експериментів обрана модель судна OSV3-АН з конвенційною схемою розташування керма та рушіїв і одним носовим підрулюючим пристроєм. Водотоннажність судна 5291 т, довжина 80,4 м, ширина 18,0 м, осадка 6,6 м, максимальна швидкість 16,3 вузла. Двигун середньо-обертовий дизель 2x6166 кВт з двома гвинтами регульованого кроку (ГПК). Для третього та четвертого експериментів обрана модель судна Ro-Ro passenger ferry 13 з конвенційною схемою розташування керма та рушіїв і одним носовим підрулюючим пристроєм. Водотоннажність судна 7796,8 т, довжина 125,0 м, ширина 23,4 м, осадка 5,3 м, максимальна швидкість 20,5 вузлів. Двигун середньо-обертовий дизель 2x4000 кВт з двома гвинтами регульованого кроку. Перший експеримент. Модель судна OSV3-АН. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма переключені на правий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 15,51$ вузол. Скриншот CONING-дисплею під час проведення першого експерименту наведено на рис. 3.

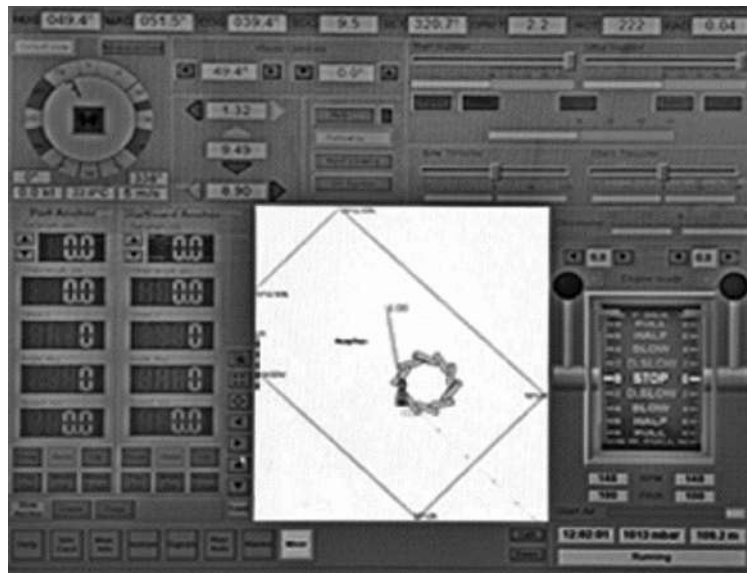


Рисунок 3 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення першого експерименту

Як видно із наведеного скриншоту, на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,49$ вузли, тангенційна швидкість носа $V_n = 1,32$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = -8,9$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту знайдемо за формулою, наведеною у роботі [15]

$$\bar{X}_{\text{пн}} = \frac{-V_n}{V_k - V_n} (\bar{X}_B - \bar{X}_A) + \bar{X}_A, \quad (7)$$

де $\bar{X}_{\text{пн}}$ – відносне значення абсциси полюсу повороту у ЗСК, \bar{X}_B – відносне положення керма (координати кормового перпендикуляру у ЗСК), \bar{X}_A – відносне положення носового перпендикуляру у ЗСК.

Після підстановки вимірянних тангенційних швидкостей та координат \bar{X}_A, \bar{X}_B у формулу (7), отримуємо

$$\bar{X}_{\text{пн}} = \frac{-1,32}{-8,9 - 1,32} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0,37.$$

Другий експеримент. Модель судна OSV3-АН. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма перекладені на лівий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 15,82$ вузла. Скриншот CONING-дисплею під час проведення другого експерименту наведено на рис. 4.

Як видно із наведеного скриншоту, на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,14$ вузла, тангенційна швидкість носа $V_n = -1,34$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = 8,81$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту за формулою (7) дорівнює

$$\bar{X}_{\text{пн}} = \frac{1,34}{8,81 + 1,34} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0,368.$$

Середнє зміщення полюсу повороту на середній швидкості $V_x = \frac{9,49 + 9,14}{2} = 9,32$ вузла, для

судна OSV3-АН, становить $\frac{0,371 + 0,368}{2} \approx 0,37$.

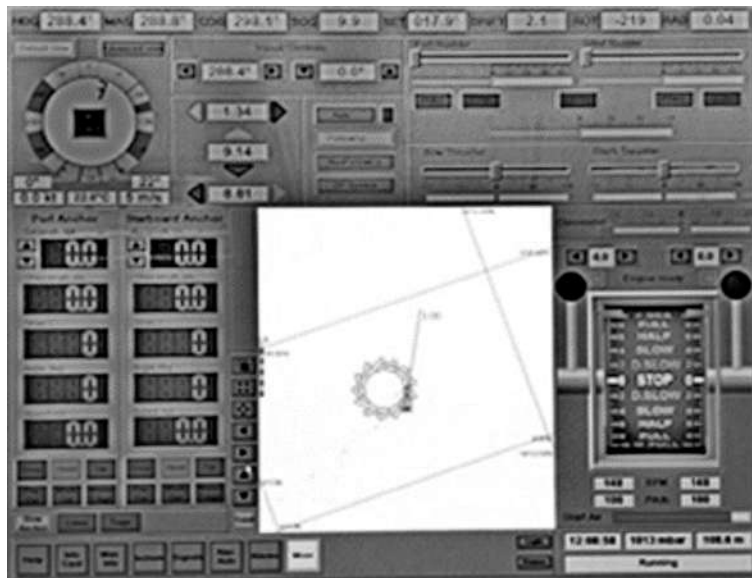


Рисунок 4 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення другого експерименту

Третій експеримент. Модель судна Ro-Ro passenger ferry 13. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма перекладені на правий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 20,18$ вузла. Скриншот CONING-дисплею під час проведення третього експерименту наведено на рис. 5.



Рисунок 5 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення третього експерименту

Як видно із наведеного скриншоту, на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,41$ вузла, тангенційна швидкість носа $V_n = 0,97$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = -8,63$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту за формулою (7) дорівнює

$$\bar{X}_{\text{m}} = \frac{-0,97}{-8,63 - 0,97} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) + \frac{1}{2} = 0,399.$$

Четвертий експеримент. Модель судна Ro-Ro passenger ferry 13. Телеграфи обох двигунів у положенні «Повний вперед». Обидва керма перекладені на лівий борт. Швидкість судна на початку експерименту $V_x(0) = 20,35$ вузла. Скриншот CONING-дисплею під час проведення четвертого експерименту наведено на рис. 6. Як видно із наведеного скриншоту,

на усталеній циркуляції швидкість судна $V_x = 9,41$ вузла, тангенційна швидкість носа $V_n = -1,98$ вузла, тангенційна швидкість корми $V_k = 10,91$ вузла. Відносне значення абсциси полюсу повороту за формулою (7) дорівнює

$$\bar{X}_{\text{min}} = \frac{1,98}{10,91 + 1,98} \left(-\frac{1}{2} - \frac{1}{2}\right) + \frac{1}{2} = 0,346$$

Середнє зміщення полюсу повороту на середній швидкості $V_x = 9,41$ вузла для судна Ro-Ro passenger ferry 13 становить $\frac{0,399 + 0,346}{2} \approx 0,37$.



Рисунок 6 – Скриншот CONING-дисплею під час проведення четвертого експерименту

Основні результати та їх обговорення. Із отриманих результатів видно, що для різних типів суден відносне значення положення полюсу повороту становить $\bar{X}_{\text{min}} \approx 0,37$. Різниця між відносним положенням полюсу повороту, визначеним на стоячому судні, і відносним положенням полюсу повороту, визначеним на циркулюючому з максимальною швидкістю судні, становить $\Delta\bar{X} = 0,37 - 0,17 = 0,2$, або $\Delta\bar{X} = 0,37 - 0,23 = 0,14$. Отримана різниця пояснюється наступними міркуваннями.

1. Графіки, наведені на рис. 1 і рис. 2, отримані для стоячого судна, що не має поздовжньої швидкості.

2. Поява поздовжньої швидкості приводить до зміщення центру обертання в сторону руху судна, а отже, і полюсу повороту, який відраховується від центру обертання.

3. Отримана різниця $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$ між положеннями полюсу повороту на стоячому і циркулюючому судні і є зміщення центру обертання на максимальній швидкості циркуляції судна.

Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що авторами експериментально доведено зміщення полюсу повороту на максимальній швидкості циркуляції, а також висказано припущення, що причиною зміщення полюсу повороту є зміщення центру обертання. Отримані результати є відтворюваними і можуть застосовуватися для усіх типів суден.

Висновки. Результати проведених експериментів та виконаних розрахунків показують, що положення полюсу повороту, розраховане для стоячого судна, відрізняється від положення полюсу повороту циркулюючого з максимальною швидкістю судна на величину $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$. На думку авторів, виявлена різниця пояснюється зміщенням

центру обертання судна відносно центру ваги/мідель шпангоуту при наявності поздовжньої швидкості. Теоретичне значення отриманих результатів полягає у експериментальному доведенні ефекту зміщення полюсу повороту та встановленні причини – зміщення центру обертання у залежності від швидкості судна. Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні ефекту зміщення центру обертання для зменшення області маневрування, що особливо важливо у стиснених водах.

Перспективи подальших досліджень. Подальші дослідження можуть бути пов'язані із експериментальним підтвердженням отриманої авторами раніше залежності між зміщенням центру обертання і швидкістю судна [11] для всього допустимого діапазону швидкостей.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Керування судном / С. І. Дьомін та ін.; під редакцією В. І. Снопкова. М.: Транспорт, 1991, 359 с.
2. Cauvier H. The Pivot Point. *The PILOT*. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association. 2008, Vol. 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
3. 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*, Vol.10, Issue 4, pp. 605–612. 2016. doi: 12.12716/1001.10.04.09.
4. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, *Norwegian university of science and technology*, Wiley, 2021.
5. Центр обертання і його переміщення, 2018. <https://sea-man.org/tsentr-vrashheniya-sudna.html>.
6. Cummins T. A. Review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation' Where is the centre of a ship's rotation? *Marine Pilots.com*, 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
7. Cummins T. A. Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong! *Marine Pilots.com*, 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
8. Nedelcu A., Lupu S., Toma A., Clinci C. Ship Maneuvering Prediction based Pivot Point Estimation, *Scientific Bulletin of Naval Academy*, Vol. XXI, 2018, pp. 81-86. doi: 10.21279/1454-864X-18-I2-008.
9. Capt. Santosha K. N. A Corrected Version on Positioning of Pivot Point, *Marine Pilots.com*, 2020. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
10. Shafran D. What is the pivot point of ship? Fully explained !, *Maritime page*. 2023. <https://maritimepage.com/pivot-point-of-ship/>.
11. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I., Kyrychenko K. Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. *Ships and offshore structures*. 2022, Vol.18, Issue 3, pp. 358–364. DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480.
12. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Saprionov O., Petrovskyi A., Ivanov A., Tymofeiev K. Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift. *Technology Audit and Production Reserves*. 2022, 6(2(68), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
13. 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, p.130–140, 2023 (ICST-2023).
14. Navi Trainer Professional 5000 (Version 5.35). Instructor Manual, 2014. Transas.

15. Tovstokoryi O. M. Moiseienko V. S. Keruvannia polozhenniam poliusu povorotu na dvohvyntovomu konventsionomu sudni // Naukovyi visnyk KhDMA. 2017, №2(17), s.101–109.

REFERENCES

1. D'omin, S. I., Zhukov, Je. I. & Kubachov, N. A. (1991). Keruvannja sudnom; pid redakcijeju V. I. Snopkova. M. : Transport.
2. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, 295. <http://www.pilotmag.co.uk/wp-content/uploads/2008/06/pilotmag-295-final-web.pdf>.
3. 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. doi: 12.12716/1001.10.04.09.
4. Fossen, T. I. (2021). Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control: second edition, Norwegian university of science and technology, Wiley.
5. Tsentr obertannia i yoho peremishchennia. (2018). <https://sea-man.org/tsentr-vrashheniya-sudna.html>.
6. Cummins, T. A. (2020). Review of the ship's pivot point: Science, Maths and Observation' Where is the centre of a ship's rotation? Marine Pilots.com. <https://www.marine-pilots.com/articles/84506-review-of-ships-pivot-point-science-maths-and-observation-where-is-centre-of-ships-rotation>.
7. Cummins, T. A. (2020). Scientific Fact: The 'traditional' understanding of the ship's pivot point is wrong! Marine Pilots.com. <https://www.marine-pilots.com/articles/81904-scientific-fact-traditional-understanding-of-ships-pivot-point-is-wrong>.
8. Nedelcu, A., Lupu, S., Toma, A. & Clinci C. (2018). Ship Maneuvering Prediction based Pivot Point Estimation, Scientific Bulletin of Naval Academy, Vol. XXI, pp. 81–86. doi: 10.21279/1454-864X-18-I2-008.
9. Capt. Santosha, K. N. (2020). A Corrected Version on Positioning of Pivot Point, Marine Pilots.com. <https://www.marine-pilots.com/articles/129891-corrected-version-on-positioning-of-pivot-point>.
10. Shafran, D. (2023). What is the pivot point of ship? Fully explained! Maritime page. <https://maritimepage.com/pivot-point-of-ship/>.
11. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Nosov, P., Popovych, I., & Kyrychenko, K. (2022). Pivot point position determination and its use for manoeuvring a vessel. Ships and offshore structures, 18(3), 358–364. DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480.
12. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Saprionov, O., Petrovskiy, A., Ivanov, A. & Tymofeiev K. (2022). Development of automatic control methods of vessel rotation around the pivot point without drift. Technology audit and production reserves, 6(2(68)), 16–21. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.269364>.
13. 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 (ICST-2023), Vol.3513, P.130–140.
14. Navi Trainer Professional 5000 (Version 5.35). Instructor Manual, 2014. Transas.
15. Tovstokoryj, O. M. & Mojsejenko, V. S. (2017). Keruvannja polozhennjam poljusu povorotu na dvohvyntovomu konvencijnomu sudni, Naukovyj visnyk KhDMA, №2 (17), 101–109.

Tovstokoryi O. M., Zinchenko S. M., Nahrybelnyi Ya. A., Tymofeiev K. V. CALCULATION OF THE VESSEL'S ROTATION CENTER DISPLACEMENT

A simple deflection of the rudder leads to the appearance of the angular rate of the vessel rotation around the rotation center and at the same time the lateral speed of movement of the rotation center. Such a complex movement of the vessel is difficult for the shipmaster to understand and make the right decision. At the same time, lateral and rotational movements can be replaced by one "pure" rotation of the vessel around another point - the pivot point. Knowing the position of the rotation center and the pivot point position allows us to

reduce the maneuvering area of the vessel, which is especially important when maneuvering in compressed waters. The purpose of the work is to determine the rotation center displacement relative to the center of gravity/middle of the frame at the maximum speed of the vessel's circulation. This aim is achieved by comparing the position of the pivot point on a stationary vessel, determined theoretically, and the position of the pivot point on a vessel circulating at maximum speed, determined during an experiment on a navigation simulator Navi Trainer 5000. Since the position of the pivot point depends only on the relative arm (between the steering wheel and the center of gravity/middle frame) of the lateral force application, which is the same in both cases, the detected difference will be the displacement of the center of rotation. The results of the conducted experiments and performed calculations show that the position of the pivot point, calculated for a stationary vessel, differs from the position of the pivot point of a vessel circulating at maximum speed by an amount of $\Delta\bar{X} = (0,14 - 0,2)$. According to the authors, the detected difference is explained by the displacement of the ship's center of rotation relative to the center of gravity/middle frame in the presence of longitudinal speed. The theoretical significance of the obtained results consists in experimentally proving the effect of the displacement of the pivot point and establishing the cause - the displacement of the center of rotation, depending on the speed of the vessel. The practical value of the obtained results is to use the effect of the displacement of the center of rotation to reduce the maneuvering area, which is especially important in compressed waters.

Key words: rotation center displacement; pivot point position; vessel circulation; maneuvering in compressed waters.

© Товстокорий О. М., Зінченко С. М., Нагрибельний Я. А., Тимофєєв К. В.

Статтю прийнято
до редакції 14.10.2023