

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ПІДТВЕРДЖЕННЯ ЕФЕКТУ ЗМІЩЕННЯ ЦЕНТРУ ОБЕРТАННЯ НА ВІТРИЛЬНИКУ «RUNNING ON WAVES»

*Зінченко С.М., Товстокорий О.М., Бень А.П., Назрибельний Я.А.
Kherson State Maritime Academy, Ukraine*

Вступ. Протягом останніх 10 років спостерігається тенденція суттєвого збільшення швидкостей та розмірів суден. Разом з тим, розміри портів ростуть значно меншими темпами, у портах стає все тісніше. Це приводить до необхідності оптимізувати процеси керування рухом судна у стиснених водах. Одним із напрямків такої оптимізації є використання концепції полюсу повороту та автоматичних модулів у автоматизованих системах [1-8]. Полюс повороту – це уявна точка діаметральної площини судна, боковий та обертальний рухи відносно якої виглядають як чисте обертання. Це дозволяє складні маневри судна із використанням кутового та бокового зміщення замінити одним обертальним рухом. Перші дослідження поведінки та використання полюсу повороту зроблені авторами Н. Ноoyer у статті «Behavior and Handling of Ships» [9], Ch. Tzeng у статті “Analysys of the Pivot Point for a turning ship” [10], A.G. Chase в статтє “Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point” [11], capt. H. Cauvier у статті “The Pivot Point” [12], J. Artyszuk у статті «Pivot point in ship manoeuvring» [13], S. G. Seo in the articles “The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring” [14] і «Safer and More Efficient Ship Handling with the Pivot Point Concept» [15]. У березні 2022 року авторами Херсонської державної морської академії Зінченко С.М., Товстокорим О.М. та ін. опублікована стаття «Pivot Point position determination and its use for manoeuvring a vessel» у журналі «Ship and Offshore structures» видавництва Tailor and Frances. [16]. У статті було показано, що при розрахунку керувань потрібно враховувати не два, як вважалося раніше, а три особливі центри: центр гравітації, центр обертання і полюс повороту, причому полюс повороту потрібно відраховувати не від центру гравітації, а від центру обертання судна. Також була отримана формула визначення величини зміщення центру обертання відносно центру гравітації, у залежності від швидкості судна. Не врахування цих факторів приводить до збільшення області маневрування майже на 25%.

Актуальність дослідження. Як зазначалося вище, врахування зміщення центру обертання відносно центру гравітації та визначення положення полюсу повороту відносно центру обертання дозволяють зменшити область маневрування судна майже на 25%. Тому, подальші дослідження у цьому напрямку, а також підтвердженням отриманих результатів на реальних суднах являються актуальними.

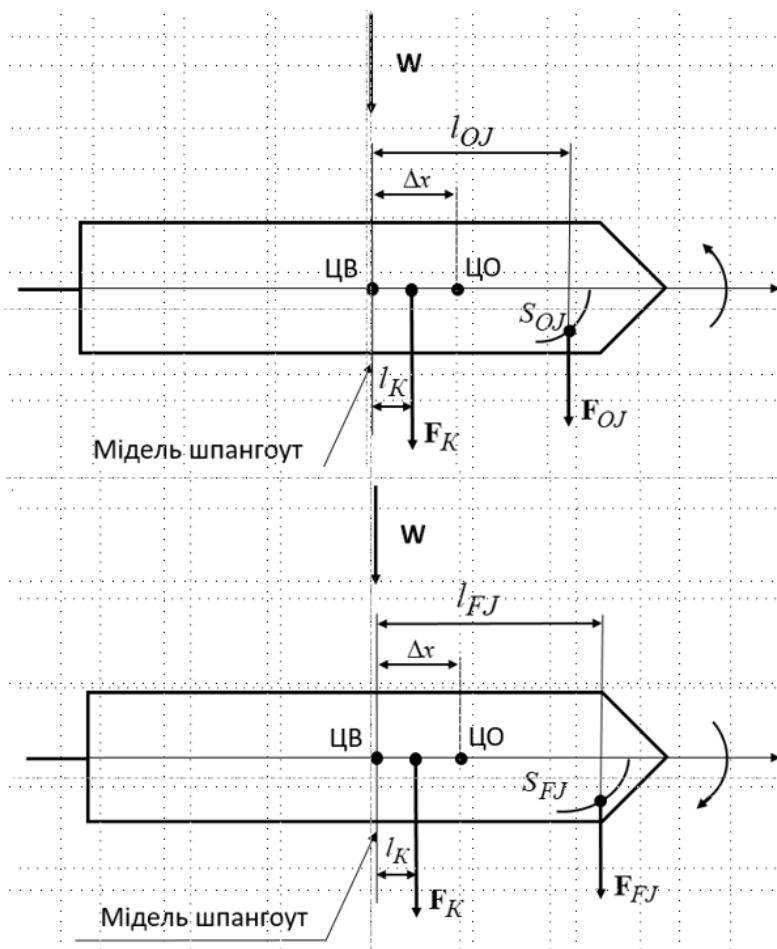
Постановка задачі. У серпні 2013 року на вітрильнику “Running on Waves”, к.д.п. Товстокорим О.М. було проведено декілька експериментів по визначенню положення ЦО та ПП. Необхідно, використовуючи отримані авторами теоретичні результати [16], обґрунтувати дані проведеного експерименту.

Результати дослідження. Характеристики судна “Running on Waves”: максимальна швидкість $V_{\max} = 10 \text{ вуз.}$, довжина між перпендикулярами $L = 45,47 \text{ м}$, площа вітрильності корпусу $S_K = 301,08 \text{ м}^2$, площа вітрильності надбудов, рангоуту, такелажу $S_H = 294,30 \text{ м}^2$, загальний центр вітрильності корпусу, надбудов, рангоуту і такелажу $x_{ЦВ} = 23,15 \text{ м}$ від кормового перпендикуляру, або $l_K = 0,41 \text{ м}$ від міделя, площа вітрильності зовнішнього

кліверу (outer jib) $S_{OJ} = 41\text{м}^2$, відстань від центру вітрильності зовнішнього кліверу до міделя $l_{OJ} = 23,86\text{м}$, площа вітрильності летючого кліверу (flying jib) $S_{FJ} = 96\text{м}^2$, відстань від центру вітрильності летючого кліверу до міделя $l_{FJ} = 26,66\text{м}$, відношення аеродинамічного коефіцієнту вітрила до аеродинамічного коефіцієнту корпусу $\frac{c_y^B}{c_y^K} = 2$.

Судно рухалося під дією головного двигуна (ГД) зі швидкістю 3 вузла, при дії бокового вітру W 15 вузлів, та утримувалося на курсі 0° шляхом перекладки керма. Перед початком експерименту ГД був застопорений, лопаті гвинта поставлені у флюгерне положення, кермо прямо і судно продовжувало рух за інерцією. При цьому судно намагалося привестися до вітру. Для утримання судна на курсі поставили зовнішній клівер (outer jib). Очікувалось, що судно після цього піде праворуч, але воно, як і раніше, продовжувало іти ліворуч, приводячись до вітру (рис.1). Потім, замість зовнішнього клівера (outer jib), поставили летючий клівер (flying jib) із більшою площею вітрильності та плечем до мідель шпангоуту. Після цього, як і очікувалося, судно вже пішло праворуч, увалюючись під вітер (рис.1).

Рисунок 1. Експеримент на вітрильнику “Running on Waves”



Аналізуючи отримані результати, автори дійшли висновку, що причиною такої поведінки судна стало наступне. На швидкості 3 вузла ЦО судна змістився від мідель шпангоуту в сторону носу на величину $\Delta x > l_K$, аеродинамічний момент від вітру $F_K(l_K - \Delta x)$ став негативним і судно почало приводитися до вітру. Після встановлення зовнішнього кліверу (outer jib), позитивний аеродинамічний момент $F_{OJ}(l_{OJ} - \Delta x)$ від зовнішнього кліверу (outer jib) був меншим негативного аеродинамічного моменту $F_K(\Delta x - l_K)$ від корпусу, надбудов, рангоуту, такелажу, сумарний момент залишався від'ємним і судно, як і раніше, прагнуло приводитися до вітру.

$$F_{OJ}(l_{OJ} - \Delta x) < F_K(\Delta x - l_K), \Delta x > \frac{F_{OJ}l_{OJ} + F_Kl_K}{F_{OJ} + F_K}$$

Аеродинамічні сили від вітру на вітрила та корпус мають вигляд

$$F_{OJ} = c_y^B \rho \frac{W^2}{2} S_{OJ}, F_K = c_y^K \rho \frac{W^2}{2} (S_K + S_H)$$

Після підстановки F_{OJ} , F_K у останню нерівність та проведення скорочень, отримаємо

$$\Delta x > \frac{c_y^B S_{OJ} l_{OJ} + c_y^K (S_K + S_H) l_K}{c_y^B S_{OJ} + c_y^K (S_K + S_H)}$$

Розділимо чисельник і знаменник на c_y^K

$$\Delta x > \frac{\frac{c_y^B}{c_y^K} S_{OJ} l_{OJ} + (S_K + S_H) l_K}{\frac{c_y^B}{c_y^K} S_{OJ} + (S_K + S_H)}$$

Підставимо числові значення у отриману нерівність

$$\Delta x > \frac{2 * 41 * 23,86 + (301,08 + 294,3) * 0,41}{2 * 41 + (301,08 + 294,3)} = \frac{2200,6}{677,38} = 3,25(м).$$

Отже, на швидкості $V = 3$ вуз. ЦО судна знаходився на відстані не менше ніж 3,25 м від мідель шпангоуту.

Після встановлення летючого кліверу (flying jib), позитивний аеродинамічний момент $F_{FJ}(l_{FJ} - \Delta x)$ від летючого кліверу виявився більшим того ж негативного аеродинамічного моменту $F_K(\Delta x - l_K)$ від корпусу судна, надбудов, рангоуту і такелажу, сумарний момент став позитивним і судно почало прагнути розвернутися по часовій стрілці та увалитися під вітер. Запишемо нерівність моментів у цьому випадку

$$F_{FJ}(l_{FJ} - \Delta x) > F_K(\Delta x - l_K), \Delta x < \frac{F_{FJ}l_{FJ} + F_Kl_K}{F_{FJ} + F_K}$$

$$F_{FJ} = c_y^B \rho \frac{W^2}{2} S_{FJ}, F_K = c_y^K \rho \frac{W^2}{2} (S_K + S_H)$$

$$\Delta x < \frac{\frac{c_y^B}{c_y^K} S_{FJ} l_{FJ} + (S_K + S_H) l_K}{\frac{c_y^B}{c_y^K} S_{FJ} + (S_K + S_H)}$$

$$\Delta x < \frac{2 * 96 * 26,66 + (301,08 + 294,3) * 0,41}{2 * 96 + (301,08 + 294,3)} = \frac{5362,8}{787,38} = 6,81(м)$$

Отже, на швидкості $V = 3$ вуз. ЦО судна знаходився на відстані не більше ніж 6,81 м від міделів шпангоуту. Таким чином, проведений експеримент дозволив встановити, що ЦО судна на швидкості 3 вузла знаходився у межах $3,25 м < \Delta x < 6,81 м$

Підрахунок за формулою $\Delta x = \frac{L}{2} (1 - \frac{V_{\max}}{V + V_{\max}})$ [8] показує, що центр обертання судна на швидкості $V = 3$ вуз. знаходиться відносно міделя на відстані

$$\Delta x = \frac{45,47}{2} (1 - \frac{10}{3 + 10}) = 22,7 * 0,23 = 5,23(м).$$

Висновки. Проведено натурний експеримент на вітрильнику “Running on Waves” по встановленню величини зміщення центру обертання відносно міделів шпангоуту. Результати експерименту дозволили встановити діапазон знаходження центру обертання. Розрахунок положення центру обертання вітрильника по отриманій авторами формулі показав, що розраховане значення знаходиться у межах діапазону, отриманого експериментальним шляхом.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zinchenko S. M., Ben A. P., Nosov P. S., Popovych I. S., Mamenko P. P., Mateichuk V. M. Improving the accuracy and reliability of automatic vessel motion control system. Radio Electronics, Computer Science, Control, vol. 2. - 2020. - pp. 183–195. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-19>
2. Nosov P. S., Popovych I. S., Cherniavskiy V. V., Zinchenko S. M., Prokopchuk Yu. A., Makarchuk D. V. Automated identification of an operator anticipation on marine transport. Radio Electronics, Computer Science, Control, vol. 3. - 2020. - pp. 158–172. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-3-15>
3. Zinchenko S., Nosov P., Mateichuk V., Mamenko P., Popovych I., Grosheva O. Automatic collision avoidance system with many targets, including maneuvering ones. Bulletin of University of Karaganda. Technical Physics, № 4(96). - 2019. - pp. 69-79. DOI: 10.31489/2019Ph4/69-79
4. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Шалаева А.А. Расчет и реализация маневра расхождения с судами целями в бортовой ЦВМ. Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві - освіта, наука, практика», Херсон, 14-16 вересня 2017 р., с. 230- 235

5. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Грошева О.А. Синтез оптимального управления судном с граничными условиями. Науковий вісник ХДМА №1(18). - 2018. - с. 18-26. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>
6. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Грошева О.А. Синтез оптимального управления судном с граничными условиями. Науковий вісник ХДМА №1(18). - с. 18-26, 2018. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>
7. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Шалаева А.А. Оценка маневренных возможностей судна с помощью нейросетевой модели, синтезируемой в процессе его штатной эксплуатации. Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві - освіта, наука, практика», Херсон, 14-16 вересня 2017 р., с. 236-240
8. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г. Использование нейросетевой модели судна для решения задач управления. Науковий вісник ХДМА, №2 (17). - 2017. - с. 231-237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>
9. Hooyer H.H. Behavior and Handling of Ships. Cornell Maritime Press. - 1983.
10. Tzeng Ch. Analysys of the pivot point for a turning ship. Journal of marine science and technology, vol. 6(1). - 1998. - pp. 39-44. <http://jmst.ntou.edu.tw/marine/6/39-44.pdf>
11. Chase A.G. Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point. The Northern Mariner. - 1999. - pp. 53-59. https://www.cnrs-scrn.org/northern_mariner/vol09/nm_9_3_53-59.pdf
12. Cauvier H. The Pivot Point. The PILOT. The official organ of the United Kingdom Maritime Pilots' Association, vol. 295. - 2008. <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, vol. 20(92). - 2010. - pp. 13-24.
14. Seo S.G. The Use of Pivot Point in Ship Handling for Safer and More Accurate Ship Manoeuvring. Proceedings of IMLA, vol. 1(29). - 2011. - 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, vol. 10(4). - 2016. - pp. 605-612. DOI: 12.12716/1001.10.04.09
16. 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. DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480