

ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ЦЕНТРУ ОБЕРТАННЯ СУДНА З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

В.В. Чернявський, А.П. Бень*, О.М. Товстокорий*, С.М. Зінченко**

**Херсонська державна морська академія
(Україна)*

Вступ. За останні роки суттєво зросла кількість суден та їх розміри, у той час як розміри портів зростають значно меншими темпами. Виникла актуальна необхідність оптимізації процесів керування судном у стиснених водах. Одним із напрямків такої оптимізації є використання полюсу повороту та врахування положення центру обертання при маневруванні. Багато статей авторів присвячені саме цим питанням. Так, у статті [1] «Behavior and Handling of Ships» Н. Нооуер досліджує поведінку центру обертання у залежності від ряду зовнішніх факторів. Зокрема, на прикладі двох буксирів, що штовхають судно лагом, показано, що поява поздовжньої швидкості судна призводить до його обертання. Автор пояснює цей ефект зміною плечей буксирів внаслідок зміщення центру обертання судна вперед. У роботі [2] А.Г. Chase «Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point» описані експерименти із центром обертання у порту Ревель. Використовуючи рушії для створення симетричних бокових сил, було відзначено, що за відсутності руху вперед ці бічні сили викликають чистий бічний рух, але, за наявності поздовжнього руху судна вперед, додатково з'являється обертальний рух. На думку автора, це пов'язано із зміщенням центру обертання судна у напрямку його руху. Автор також надає практичні рекомендації щодо використання цього ефекту для керування судном (збільшення керуючого моменту або зменшення впливу зовнішніх факторів). У 2008 році газета «The Pilot», яка є офіційним органом Асоціації морських лоцманів Сполученого Королівства, опублікувала статтю капітана Н. Sauvier під назвою "The Pivot Point" [3], у якій було зазначено, що центр бокового опору судна знаходиться між центром гравітації і центром підводної частини судна, із врахуванням поля тиску навколо судна. У роботах [4-9] зроблено припущення, що центр обертання судна повинен знаходитися у точці, відносно якої довільний обертаючий момент має найбільшу ефективність. Виходячи із цього припущення, вперше отримано формулу зміщення центру обертання відносно центру гравітації, у залежності від швидкості судна. У роботах [10, 11] приведено метод розрахунку положення полюсу повороту із використанням вимірних тангенціальних швидкостей носа і корми судна, що дозволяє значно підвищити точність розрахунку положення полюсу повороту. У роботах [12-35] розглянуті питання використання автоматичних модулів керування у автоматизованих системах для вирішення різних функціональних задач, включаючи маневрування з використанням полюсу повороту і центру обертання.

Актуальність дослідження. Із зазначеного вище видно, що на сьогодні існує актуальна необхідність оптимізації процесів керування у стиснених водах, з метою зменшення необхідного простору для маневрування. Цього можна досягти за рахунок правильного уявлення про рух судна у водному середовищі, яке залежить від знання поведінки центру обертання. Тому, вивчення питань, пов'язаних із визначенням положення центру обертання являється актуальною науково – технічною задачею.

Постановка задачі. На рис.1 наведена розрахункова схема із нанесеними позначеннями: сили упору гвинта P , кута відхилення керма δ , центру обертання O , бокової швидкості V_y центру обертання O , кутової швидкості обертання судна ω_z , вимірної бокової швидкості мідель шпангоуту V_y^m , вимірної кормової швидкості V_k^m , довжини судна L , відстані від корми до мідель шпангоуту $\frac{L}{2}$, відстані від мідель

шпангоуту до центру обертання Δl . Потрібно оцінити параметри вектору стану та зміщення Δl центру обертання відносно мідель шпангоуту.

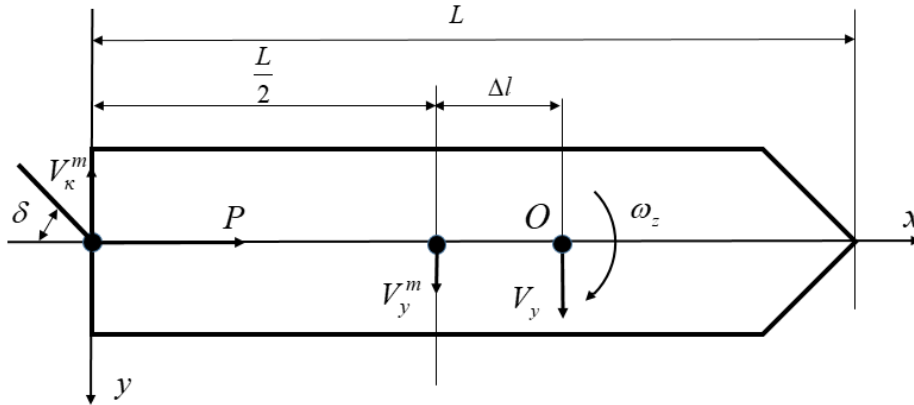


Рисунок 1 – Розрахункова схема

Результати дослідження. Спрощена система лінеаризованих диференціальних рівнянь лінійного та кутового руху судна має вигляд

$$\begin{cases} m\dot{V}_x = \frac{\partial P_x}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial F_x}{\partial V_x} V_x - \frac{\partial F_x}{\partial \delta} \delta \\ m\dot{V}_y = \frac{\partial P_y}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial F_y}{\partial V_y} V_y + \frac{\partial F_y}{\partial \delta} \delta \\ I_z \dot{\omega}_z = -\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z - \frac{\partial P_y}{\partial \Theta} \Theta \left(\frac{L}{2} + \Delta l\right) - \frac{\partial F_y}{\partial \delta} \delta \left(\frac{L}{2} + \Delta l\right) \end{cases} \quad (1)$$

На основі системи (1) записуємо математичну модель спостерігаючого пристрою Льюенберга

$$\begin{cases} m\dot{V}_x = \frac{\partial P_x}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial F_x}{\partial V_x} V_x - \frac{\partial F_x}{\partial \delta} \delta + \lambda_1 (V_x^m - V_x) \\ m\dot{V}_y = \frac{\partial P_y}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial F_y}{\partial V_y} V_y + \frac{\partial F_y}{\partial \delta} \delta + \lambda_2 (V_y^m + \omega_z \Delta l - V_y) \\ I_z \dot{\omega}_z = -\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z - \frac{\partial P_y}{\partial \Theta} \Theta \left(\frac{L}{2} + \Delta l\right) - \frac{\partial F_y}{\partial \delta} \delta \left(\frac{L}{2} + \Delta l\right) + \lambda_3 (\omega_z^m - \omega_z) \end{cases} \quad (2)$$

де V_x^m , V_y^m , ω_z^m - виміряні значення поздовжньої швидкості, бокової швидкості мідель шпангоуту та кутової швидкості судна.

Із рівняння для кормової швидкості судна $V_\kappa^m = V_y - \omega_z \left(\frac{L}{2} + \Delta l\right)$, див. рис.1, знаходимо зміщення центру обертання відносно мідель шпангоуту

$$\Delta l = \frac{V_y - V_\kappa^m}{\omega_z} - \frac{L}{2}. \quad (3)$$

Зміщення Δl (3) враховується у каналах бокового та кутового руху (друге та третє рівняння системи (2)). Для згладжування інформації використовуємо аперіодичну ланку

$$\dot{\Delta l} = \frac{1}{T} \left[-\Delta l + \frac{V_y - V_\kappa^m}{\omega_z} - \frac{L}{2} \right].$$

Повна система диференціальних рівнянь для спостереження параметрів вектору стану і положення центру обертання має вигляд

$$\begin{cases} m \dot{V}_x = \frac{\partial P_x}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial F_x}{\partial V_x} V_x - \frac{\partial F_x}{\partial \delta} \delta + \lambda_1 (V_x^m - V_x) \\ m \dot{V}_y = \frac{\partial P_y}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial F_y}{\partial V_y} V_y + \frac{\partial F_y}{\partial \delta} \delta + \lambda_2 (V_y^m + \omega_z \Delta l - V_y) \\ I_z \dot{\omega}_z = -\frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z - \frac{\partial P_y}{\partial \Theta} \Theta \left(\frac{L}{2} + \Delta l \right) - \frac{\partial F_y}{\partial \delta} \delta \left(\frac{L}{2} + \Delta l \right) + \lambda_3 (\omega_z^m - \omega_z) \\ \dot{\Delta l} = \frac{1}{T} \left[-\Delta l + \frac{V_y - V_\kappa^m}{\omega_z} - \frac{L}{2} \right] \end{cases} \quad (4)$$

Висновки.

- розроблено метод оцінювання параметрів вектору стану і положення центру обертання із використанням лінеаризованої математичної моделі лінійного та кутового руху судна, на відміну від існуючих методів забезпечує постійне оцінювання положення центру обертання та його подальше використання у системі керування, що дозволяє оптимізувати рух судна та зменшити необхідний простір для маневрування;
- розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення модулів автоматичного керування у автоматизованій системі, що використовують даний метод;
- працездатність та ефективність методу, алгоритмічного і програмного забезпечення перевірені математичним моделюванням у середовищі MATLAB та на стенді імітаційного моделювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Hooyer H.H. Behavior and Handling of Ships. *Cornell Maritime Press*. 1983.
2. Chase A.G. Sailing Vessel Handling and Seamanship – The Moving Pivot Point *The Northern Mariner*. 1999. P. 53-59. https://www.cnrs-scrn.org/northern_mariner/vol09/nm_9_3_53-59.pdf
3. 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>
4. Зінченко С.М. Теоретичні та практичні засади автоматизації процесів керування рухом суден на основі відкритих модульних систем. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, Херсонський національний технічний університет, Херсон, 2021р., 314с.
5. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor, Kyrychenko Kostiantyn. Pivot Point position determination and its use for maneuvering the vessel // Ship and offshore structure. DOI:10.1080/17445302.2022.2052480, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17445302.2022.2052480>
6. Zinchenko S., Mamenko P., Nosov P., Mateichuk V., Kyrychenko K., Grosheva O. Use of the Pivot Point concept for automatic control of a vessel without drift angle // Materials of the international scientific and practical conference MPP&O-2022, Одеса – Стамбул – Одеса, 18-21 April 2022.
7. Zinchenko S., Tovstokoriy O. Using the rotation center and Pivot Point to optimize vessel's maneuver // Materials of the VII International Scientific and Practical Conference

- "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice", Kherson, September 9-12, 2020, p.108-112
8. S. Zinchenko, O. Tovstokoryi. What is the Pivot Point and how to use it to control the vessel // Materials of the XII International Scientific and Practical Conference "Advanced Information and Innovative Technologies for Transport (MINTT - 2020), May 27-29, 2020, Kherson.
 9. Zinchenko S.M., captain Tovstokoryi O.M. Determination Pivot Point position and its use for maneuvering the vessel // Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020, April 2020, ODESSA-ISTANBUL-ODESSA. https://drive.google.com/file/d/1iHP7dN5IuzYEbG4f_ISIUlv441bj8Rp/view
 10. Товстокорый О.Н. Экспериментальное определение положения полюса поворота по тангенциальным составляющим носа и кормы // Науковий вісник Херсонської державної морської академії. – 2014. - № 1(10). – с.57-63.
 11. Товстокорый О.Н., Мальцев С. Э. Определение положения полюса поворота с помощью доплеровского лага // Судовождение: Сборник научных трудов НУ «ОМА». - вып.26. - Одесса: ИздатИнформ. - 2016. – С.183 –190.
 12. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г.. Расхождение с маневрирующими целями // Науковий вісник ХДМА №2 (17), с. 36-43, 2017. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>
 13. 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 2017р., с. 230- 235
 14. Зинченко С.М., Матейчук В.М., Ляшенко В.Г. Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті а виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018р., с.27-29
 15. Зинченко С.Н., Маменко П.П., Грошева О.А. Сокращение времени численного интегрирования математической модели судна в бортовом вычислителе // Науковий вісник ХДМА №1(18), с. 171-177, 2018. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>
 16. 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>
 17. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г. Использование нейросетевой модели судна для решения задач управления // Науковий вісник ХДМА №2 (17), с. 231-237, 2017. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>
 18. 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 а виробництві освіта, наука, практика», Херсон, 14-16 вересня 2017р., с. 236-240
 19. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г., Грошева О.А. Оптимальное управление избыточными структурами азиподов // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13-15 вересня 2018р., с.78-81
 20. Зинченко С.Н., Носов П.С., Грошева О.А., Маменко П.П., Матейчук В.Н. Управление судном в условиях внешних воздействий // Матеріали XI МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2019), 28-30 травня 2019р., Херсон с. 177-178
 21. Зинченко С.Н., Носов П.С., Маменко П.П., Грошева О.А., Матейчук В.Н. Избыточность по управлению как количественная мера маневренности судна //

- Матеріали XI МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT – 2019), 28-30 травня 2019 р., Херсон с. 97 – 99
22. Zinchenko S.M., Mamenko P.P., Grosheva O.O., Mateichuk V.M. Automatic control of the vessel's movement under external conditions // Науковий вісник ХДМА, №2(21), 2019. – с.10-15. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.010-015. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/480/416>
 23. Зинченко С.Н., Носов П.С., Маменко П.П., Грошева О.А., Матейчук В.Н. Использование математической модели ЧЭ гирокомпаса для учета инерционной девиации // Матеріали VI МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 11-14 вересня 2019, с. 203 – 206
 24. Moiseenko V.S., Zinchenko S.M., captain Tovstokoryi O.M. Automatic beam control of laser – optical position reference system // Materials of the II International Scientific and Practical Maritime Conference of the Department of Power Plants and TE of Odessa National Maritime University MPP & O-2020, April 2020, Odessa-Istambul-Odessa. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>
 25. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Mateichuk V.M., Mamenko P.P., Grosheva O.O. Automatic Collision Avoidance with many targets, including maneuvering ones // Materials of the International scientific and practical conference dedicated to the memory of professors Fomin Yu. Ya. And Semenov V. S., Odessa (Ukraine) – Istanbul (Turkey) – Odessa (Ukraine), 24-28 April 2019, pp. 343-349.
 26. Mamenko P.P., Zinchenko S.M., Nosov P.S., Popovych I.S. Solution of the Problem of optimizing route with using the risk criterion // Materials of the International Scientific Conference "Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence" (ICDMCI-2021), 24-28 May 2021, Jeleznyi Port.
 27. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Nosov P., Popovych I., Kobets V., Abramov G. Mathematical support of the vessel information and risk control systems // CEUR Workshop Proceedings, 2805, P. 335-354, 2020. <http://ceur-ws.org/Vol-2805/paper25.pdf>
 28. Zinchenko S., Tovstokoryi O., Ben A., Nosov P., Popovych I., Nahrybelnyi Ya. Automatic optimal control of a vessel with redundant structure of executive devices // International Scientific Conference "Intellectual decision-making systems and problems of computational intelligence" (ICDMCI-2021), 24-28 May 2021, Jeleznyi Port.
 29. Mateichuk V., Zinchenko S., Nosov P. Automatic evaluation of skill of controlling ship in navigation simulator // Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice", September 9-12, 2020, p. 149-152, Kherson
 30. Zinchenko S. Study of a minimally excessive complanary control structure with two azimuth control devices // Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice", September 9-12, 2020, p. 319-325, Kherson.
 31. Zinchenko S., Moiseenko V. Increasing the accuracy and reliability of a dynamic positioning laser system // Materials of the VII International Scientific and Practical Conference "Life Safety in Transport and Production: Education, Science, Practice", September 9-12, 2020, p. 326-330, Kherson.
 32. Cherniavskiy V.V., Zinchenko S.M., Nosov P.S. The use of excessive actuator structures in automatic vessel movement control systems // Materials of the III International Maritime Scientific Conference of the ship power plants and technical operation department of odessa national maritime university (MPP&O-2021), Odessa, April 29-30, 2021, p. 466-472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>
 33. Zinchenko S.M., Nosov P.S., Popovych I.S. Control redundancy as a quantitative measure of maneuverability // Науковий вісник ХДМА, 2021. № 3(21). С. 23-35.
 34. Зинченко С.Н., Гарболинская О.И., Шалаева А.А. Создание упрощенной математической модели судна для решения прикладных задач управления // Матеріали X МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», Херсон, 29-31 травня 2018р., с.208-211