

3. Попович, М. Г., Ковальчук, О. В. (2007). *Теорія автоматичного керування*. Підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. К.: Либідь, 2007, 656 с.

4. Дакі, О. А., Іваненко, В. М., Федунів, В. М., & Чебан, В. І. (2021). Побудова нечіткого регулятора стабілізації судна на траєкторії. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*, 3(69), 126–133. <https://doi.org/10.30748/zhups.2021.69.16>

## КЕРУВАННЯ ОБЕРТАННЯМ СУДНА НАВКОЛО ПОЛЮСУ ПОВОРОТУ

*Сергій Зінченко, Олег Товстокорий, Вадим Матейчук*

*Херсонська державна морська академія,  
(Україна)*

**Вступ.** За останні 20 років кількість та габарити суден суттєво зросли, у той час як розміри портів зросли значно менше. Ці обставини потребують оптимізації процесів керування, з метою зменшення простору для маневрування [1-2]. Одним із шляхів оптимізації є використання концепції полюсу повороту [3] – альтернативного бачення процесу повороту судна. Просте відхилення стерна призводить до появи одночасно обертального руху навколо центру обертання і бокового руху судна. Для судноводія ці два рухи виглядають як одне чисте обертання навколо уявної точки, яка не завжди співпадає з центром обертання і називається полюсом повороту. Використання полюсу повороту для зменшення області маневрування раніше досліджувалося багатьма авторами. В основному, ці дослідження зводилися до визначення положення полюсу повороту та надання рекомендацій судноводіям щодо врахування цього положення при ручному маневруванні. Недоліком таких підходів є те, що вони не передбачають розрахунок керувань, необхідних для реалізації обертання судна навколо заданого положення полюсу повороту. Керування формуються судноводієм вручну на основі наданих рекомендацій. У попередніх роботах авторів, наприклад, [10-12], розроблені методи автоматизації процесів обертання судна навколо полюсу повороту. Також розглянуті питання автоматизації допоміжних процесів: розходження суден [4], оптимального швартування [5], ідентифікації параметрів [6-7], тестування автоматичних модулів [8], скорочення часу інтегрування математичної моделі в бортовому обчислювачі [9] та інші.

**Актуальність досліджень.** У даній роботі розглянуті питання автоматичного формування керувань для реалізації обертання судна навколо заданого положення полюсу повороту. Розраховані керування можуть надаватися судноводієві у вигляді підказки, або використовуватися безпосередньо системою керування, що дозволить зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити затримки на формування керувань, зменшити область маневрування та в цілому підвищити безпеку судноплавства. Тому, розробка таких методів є актуальною науково – технічною задачею.

**Постановка задачі.** Для схеми судна, наведеної на рис.1, розробити метод формування керувань обертанням навколо заданого положення полюсу повороту без поздовжньої швидкості та дослідити їх.

На схемі зображено: центр обертання  $RC$ , полюс повороту  $P.P.$ , кормовий підрулюючий пристрій  $BT_1$ , носовий підрулюючий пристрій  $BT_2$ , відхилення телеграфу  $\delta_1$  кормового підрулюючого пристрою, відхилення телеграфу  $\delta_2$  носового підрулюючого пристрою, бокова сила  $F_y(\delta_1)$  кормового підрулюючого пристрою, бокова сила  $F_y(\delta_2)$  носового підрулюючого пристрою, довжина судна  $L$ , відстань  $R$  від полюсу повороту до центру обертання, плече  $l_1$  сили  $F_y(\delta_1)$  до центру обертання, плече  $l_2$  сили  $F_y(\delta_2)$  до центру обертання.

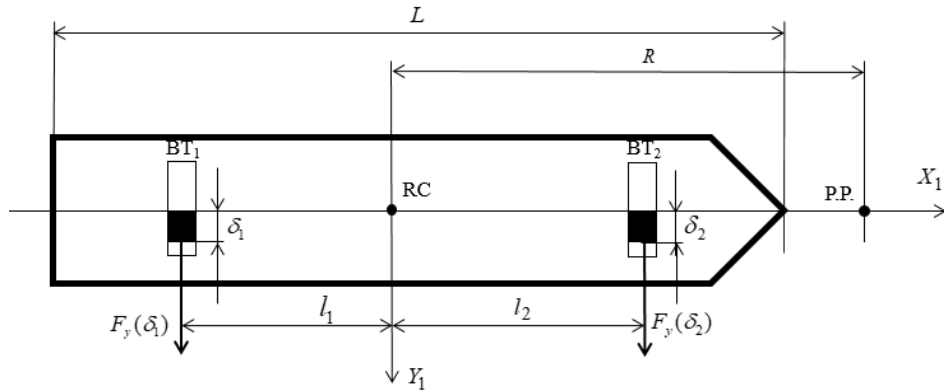


Рисунок 1 – Схема керування судном

**Результати дослідження.** Лінеаризована система диференціальних рівнянь бокового і кутового руху судна, схема керування якого зображена на рис.1, має вигляд

$$m \frac{dV_y}{dt} = \frac{dF_y}{d\delta_1} \delta_1 + \frac{dF_y}{d\delta_2} \delta_2 - \frac{dF_y}{dV_y} V_y, \quad (1)$$

$$I_z \frac{d\omega_z}{dt} = -\frac{dF_y}{d\delta_1} l_1 \delta_1 + \frac{dF_y}{d\delta_2} l_2 \delta_2 - \frac{dM_z}{d\omega_z} \omega_z,$$

Для усталеного руху  $\left( \frac{dV_y}{dt} = 0, \frac{d\omega_z}{dt} = 0 \right)$ , із врахуванням того, що характеристики BT1 та BT2 однакові, із системи (1) отримуємо

$$V_y = \frac{dF_y}{d\delta} \frac{dV_y}{dF_y} (\delta_1 + \delta_2), \quad (2)$$

$$\omega_z = \frac{dF_y}{d\delta} \frac{d\omega_z}{dM_z} (-l_1 \delta_1 + l_2 \delta_2).$$

Після підстановки значень  $V_y$ ,  $\omega_z$  із системи (2) у формулу визначення положення полюсу повороту  $R = -\frac{V_y}{\omega_z}$  та проведення не складних перетворень, отримуємо

$$\delta_1 = -\frac{\left( \frac{dV_y}{dF_y} + R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_2 \right)}{\left( \frac{dV_y}{dF_y} - R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_1 \right)} \delta_2 \quad (3)$$

Рівняння (3) дозволяє визначити керування  $\delta_1$  через керування  $\delta_2$ , для реалізації розвороту судна навколо заданого положення полюсу повороту  $R$ .

Коефіцієнт  $k_{ru} = -\frac{\left( \frac{dV_y}{dF_y} + R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_2 \right)}{\left( \frac{dV_y}{dF_y} - R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_1 \right)}$  розподіляє керування між виконавчими пристроями,

тому у подальшому будемо називати його коефіцієнтом розподілу керувань. Коефіцієнт розподілу керувань залежить від гідродинамічних характеристик судна, плечей підрулюючих пристроїв відносно центру обертання і заданого положення полюсу повороту  $R$ . Також із наведеної формули видно, що функція  $k_{ru}(R)$  має точку нуля і точку розриву функції. Графік  $k_{ru}(R)$ , для офшорного судна OSV3, наведено на рис.2.

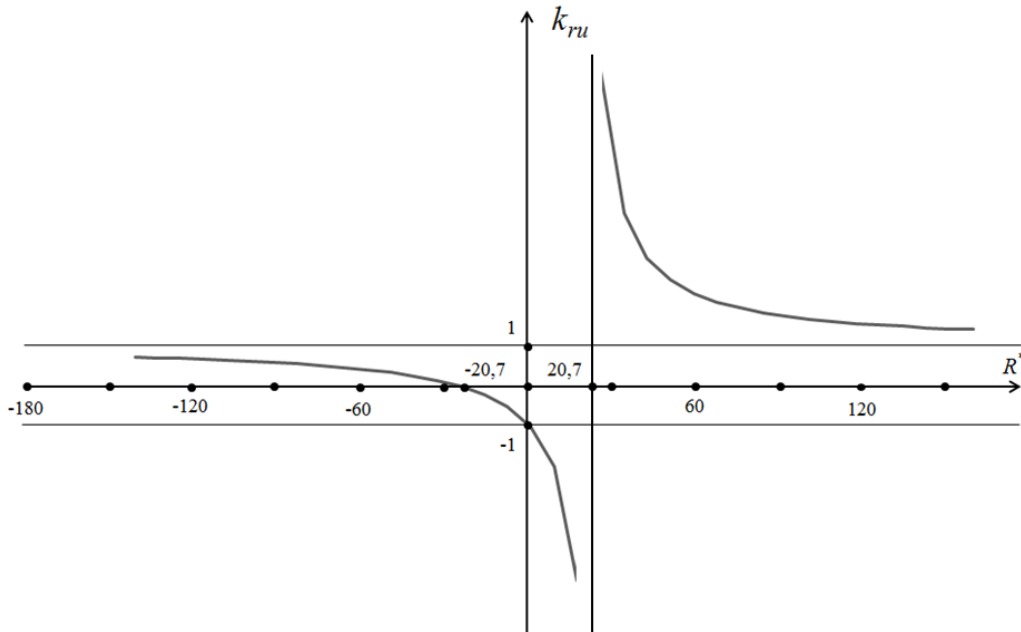


Рисунок 2 – Графік залежності коефіцієнту розподілу керувань від заданого положення полюсу повороту для офшорного судна OSV3

Розглянемо кілька приватних випадків.

1. Поліус повороту знаходиться в центрі обертання,  $R = 0$ . Із формули (3) отримуємо

$$\delta_1 = -\delta_2, \quad (4)$$

тобто підрулюючі пристрої повинні створювати бокові сили однакової величини і протилежного знаку.

2. Точка розриву функції,  $k_{ru}(R) \rightarrow \pm\infty$ . На рис.2 точка розриву відповідає значенню  $R = 20,7m$ . Із формули (3) отримуємо

$$\delta_1 = (\mp\infty)\delta_2 \rightarrow \delta_2 = 0, |\delta_1| \leq \delta_{\max}. \quad (5)$$

Результат (5) означає, що при відхиленні тільки телеграфу кормового підрулюючого пристрою, судно буде обертатися навколо полюсу повороту  $R = 20,7m$  (поліус повороту зміщений у носову частину судна відносно центру обертання).

3. Точка нуля функції  $k_{ru}(R) = 0$ . На рис.2 точка нуля відповідає значенню  $R = -20,7m$ . Із формули (3) отримуємо

$$\delta_1 = (0)\delta_2 \rightarrow \delta_1 = 0, |\delta_2| \leq \delta_{\max}. \quad (6)$$

Результат (6) означає, що при відхиленні тільки телеграфу носового підрулюючого пристрою, судно буде обертатися навколо полюсу повороту  $R = -20,7m$  (поліус повороту зміщений у корму судна відносно центру обертання).

4. Оптимальні керування. Як видно із формули (3), обертання навколо заданого положення полюсу повороту  $R = R^*$  може бути реалізовано нескінченною кількістю наборів

керувань  $\{\delta_1, \delta_2\}$ , а отже, серед них є оптимальні. Оптимальність керування полягає у мінімізації часу повного обертання навколо полюсу повороту. Це досягається у наступних випадках

$$\delta_1 = \pm \frac{\left(\frac{dV_y}{dF_y} + R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_1\right)}{\left(\frac{dV_y}{dF_y} - R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_2\right)} \delta_{\max}, |k_{ru}| \leq 1 \quad (7)$$

$$\delta_2 = \pm \frac{\left(\frac{dV_y}{dF_y} - R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_1\right)}{\left(\frac{dV_y}{dF_y} + R * \frac{d\omega_z}{dM_z} l_2\right)} \delta_{\max}, |k_{ru}| \geq 1 \quad (8)$$

**Висновки.** Для схеми судна з носовим та кормовим підрулюючими пристроями розроблено метод формування керувань обертанням навколо заданого положення полюсу повороту без поздовжньої швидкості. Досліджено коефіцієнт розподілу керувань. Розглянуті приватні випадки керування обертанням судна навколо полюсу повороту для особливих точок функції  $k_{ru}(R)$ . Розглянуті оптимальні керування. Отримані результати дозволяють розрахувати керування для реалізації обертання судна навколо заданого положення полюсу повороту, надавати їх судоводієві у вигляді підказки, або використовуватися безпосередньо системою керування, що дозволяє зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити затримки на формування керувань, зменшити область маневрування та в цілому підвищити безпеку судноплавства.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Cauvier, H. (2008). The Pivot Point. 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>.
2. Artyszuk, J. (2010). Pivot point in ship manoeuvring. Scientific Journals Maritime University of Szczecin. Vol. 20, Issue 92, pp.13-24. 2010.
3. 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](https://www.academia.edu/36456506/The_Use_of_Pivot_Point_in_Ship_Handling_for_Safer_and_More_Accurate_Ship_Manoeuvring).
4. Зинченко, С. Н., Ляшенко, В. Г., Шалаева, А. А. (2017). 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. (2018). Синтез оптимального управления судном с граничными условиями. Науковий вісник ХДМА №1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
6. Зинченко, С. Н., Ляшенко, В. Г. (2017). Использование нейросетевой модели судна для решения задач управления. Науковий вісник ХДМА №2 (17), с. 231-237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>.
7. Зинченко, С. Н., Ляшенко, В. Г., Шалаева, А. А. (2017). Оценка маневренных возможностей судна с помощью нейросетевой модели, синтезируемой в процессе его штатной

експлуатації. Матеріали IV МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 14-16 вересня 2017 р., с.236-240.

8. Зінченко, С. М., Матейчук, В. М., Ляшенко, В. Г. (2018). Використання інформаційних систем моделювання для розробки та тестування систем автоматичного керування рухом судна. Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика, Херсон, 13-15 вересня 2018р., с.27-29 .

9. Зинченко, С. Н., Маменко, П. П., Грошева, О. А. (2018). Сокращение времени численного интегрирования математической модели судна в бортовом вычислителе. Науковий вісник ХДМА №1(18). <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>

10. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O. (2020). 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.

11. Kobets, V., Popovych, I., Zinchenko, S., Nosov, P., Tovstokoryi, O. (2023). Control of the Pivot Point Position of a Conventional Single-Screw Vessel. Information Control Systems and Technologies (ICST-2023), Odessa, 21-23.09. <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper11.pdf> ICST, 130-140

12. Zinchenko, S., Tovstokoryi, O., Sapronov, 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>.

## CONTROL OF THE VESSEL'S ROTATION AROUND THE PIVOT POINT

Serhii Zinchenko,

Oleh Tovstokoryi,

Vadym Mateichuk

Kherson State Maritime Academy

(Ukraine)

**Introduction.** Over the past 20 years, the number and dimensions of ships have grown significantly, while the size of ports has grown significantly less. These circumstances require optimization of control processes in order to reduce the area for maneuver. One of the ways of optimization is the use of the pivot point concept – alternative vision of the ship turning process. A simple deviation of the rudder leads to the simultaneous appearance of rotational movement around the rotation center and lateral movement of the vessel. For the navigator, these two movements look like one pure rotation around imaginary point, which does not always coincide with the rotation center and is called the pivot point. The use of a pivot point to reduce the maneuvering area was previously studied by many authors. Basically, these studies were limited to determining the position of the pivot point and providing recommendations to shipmasters to take this position into account during manual maneuvering. The disadvantage of such approaches is that they do not include the calculation of the controls necessary to implement the rotation of the ship around the given position of the pivot point. Controls are formed manually by the master based on the recommendations provided. In the previous works of the authors, for example [10-12], methods of automating the processes of rotation of the ship around the pivot point were developed. The issues of automation of auxiliary processes are also considered: separation of vessels [4], optimal mooring [5], identification of parameters [6-7], testing of automatic modules [8], reduction of the mathematical model integration time in the on-board computer [9] and others.