
УДК 656.61.052

USE OF THE PIVOT POINT CONCEPT FOR AUTOMATIC CONTROL OF A VESSEL WITHOUT DRIFT ANGLE

**S. Zinchenko, P. Mamenko, P. Nosov, V. Mateichuk, K. Kyrychenko,
O. Grosheva**

Kherson State Maritime Academy

***Abstract:** In recent years, the number of ships and their size has increased significantly, while the size of ports is growing at a much slower pace. There is an urgent need to optimize maneuvering processes in compressed waters. Specialists drew attention to the use of the pivot point concept when maneuvering the vessel in compressed waters, which allows lateral and angular movement of the vessel in the yaw channel to replace one rotational motion around a conditional point – the pivot point. The use of the pivot point concept for maneuvering the vessel with longitudinal speed is investigated, the mathematical modeling of the long approach of the vessel to the mooring object without drift angle is carried out.*

***Keywords:** pivot point, center of circulation, linearized model, steady motion, control lines, imitation modeling stand.*

ВИКОРИСТАННЯ КОНЦЕПЦІЇ ПОЛЮСУ ПОВОРОТУ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ РУХОМ СУДНА БЕЗ КУТА ДРЕЙФУ

**С. М. Зінченко, П. П. Маменко, П. С. Носов, В. М. Матейчук,
К. В. Кириченко, О. О. Грошева**

Херсонська державна морська академія

***Анотація:** За останні роки суттєво зросла кількість суден та їх розміри, у той час як розміри портів ростуть значно меншими темпами. Виникла актуальна необхідність оптимізації процесів маневрування у стиснених водах. Спеціалісти звернули увагу на використання концепції полюсу повороту при маневруванні судном у стиснених водах, яка дозволяє боковий та кутовий рух судна у каналі русання замінити одним обертальним рухом навколо умовної точки – полюсу повороту. У роботі досліджені питання використання концепції полюсу повороту для маневрування судна з поздовжньою швидкістю, проведено математичне моделювання дальнього підходу судна до швартової стінки без кута дрейфу.*

***Ключові слова:** полюс повороту, центр циркуляції, лінеаризована модель, ustalений рух, лінії керувань, стенд імітаційного моделювання.*

Over the past 10–20 years, the intensity of navigation and the speed of vessels have increased significantly, and with them the flow of information has also increased. It is becoming increasingly difficult for skippers to find the right control decisions, especially in critical situations, which is the reason for the increasing number of accidents in maritime transport. Accident statistics in the global maritime industry show that 85% of all accidents occur due to the fault of the human factor. According to experts, a significant reduction in accidents can be achieved only by reducing human intervention in control, namely through the creation of decision support systems (DSS), ergatic [1, 2] and automated systems with automatic control modules [3–14]. DSS control the operation of individual navigation modules and, in the event that the operating parameters of the modules go beyond the permissible limits, issue warning messages or even give “advice” on how to control the vessel. The navigator must comprehend the information received before making a decision, which also takes time [1, 2]. In this regard, automated systems with automatic control modules deserve special attention. In this case, the navigator only makes a decision to activate the automatic control mode and observes its implementation from the outside. In this paper, one of such automatic control modules is considered, which uses the concept of the pole of turn to control the movement of the vessel without a drift angle under external influences.

In article [19] it is shown that the position of the pivot point, taking into account the longitudinal speed of the vessel can be found from the vector equation

$$\mathbf{V} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{R} = \mathbf{0},$$

where $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ is the vector of linear speed of the vessel,

$\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ is the vector of angular rate of the vessel,

$\mathbf{R} = (R_x, R_y, R_z)$ is the vector that determines the position of the pivot point.

Explaining the given vector equation along the axes of the connected coordinate system, we obtain

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 0 & 0 & \omega_z \\ R_x & R_y & R_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

where

$$\begin{aligned} V_x - R_y \omega_z = 0 & \rightarrow R_y = \frac{V_x}{\omega_z}, \\ V_y + R_x \omega_z = 0 & \rightarrow R_x = -\frac{V_y}{\omega_z}. \end{aligned}$$

In Fig. 1 shows the movement of the vessel with longitudinal speed without drift angle and with drift angle, as well as the position of the pivot point and the center of circulation.

As can be seen from the figure, the movement of the vessel with a drift angle in some cases (for example, during mooring) is impossible, as it leads to the accumulation of the vessel on the mooring wall.

In Fig. 2 shows a scheme of control of a vessel having a longitudinal speed.

For steady state ($\frac{dV_x}{dt} = 0, \frac{dV_y}{dt} = 0, \frac{d\omega_z}{dt} = 0$), system (1) can be written as

$$\left\{ \begin{array}{l} V_x = \frac{\partial V_x}{\partial F_x} \left(\frac{\partial P}{\partial \theta} \theta - \frac{\partial F_x}{\partial \delta_R} \delta_R \right), \\ V_y = \frac{\partial V_y}{\partial F_y} \left[\frac{\partial F_y}{\partial \delta} (\delta_1 + \delta_2) + \frac{\partial F_y}{\partial \theta} \theta + \frac{\partial F_y}{\partial \delta_R} \delta_R \right], \\ \omega_z = \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} \left\{ - \frac{\partial F_y}{\partial \theta} (l_P + \Delta x) \theta - \frac{\partial F_y}{\partial \delta_R} (l_R + \Delta x) \delta_R + \right. \\ \left. + \frac{\partial F_y}{\partial \delta} [-(l_1 + \Delta x) \delta_1 + (l_2 - \Delta x) \delta_2] \right\}, \\ \left| \theta \right| \leq \frac{\pi}{2}, \left| \delta_R \right| \leq \delta_{R \max}, \left| \delta_1 \right| \leq \delta_{\max}, \left| \delta_2 \right| \leq \delta_{\max}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Considering $R = -\frac{V_y}{\omega_z}$, after simple transformations, we get a line of control

$R = R^*$, ensuring the vessel rotation around a given pivot point R^* .

$$\begin{aligned} \delta_1 = & - \frac{\left[\frac{\partial V_y}{\partial F_y} + R^* \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} (l_2 - \Delta x) \right]}{\left[\frac{\partial V_y}{\partial F_y} - R^* \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} (l_1 + \Delta x) \right]} \delta_2 + \frac{\frac{\partial F_y}{\partial \theta} \frac{\partial \delta}{\partial F_y} \left[- \frac{\partial V_y}{\partial F_y} + R^* \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} (l_P + \Delta x) \right]}{\left[\frac{\partial V_y}{\partial F_y} - R^* \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} (l_1 + \Delta x) \right]} \theta + \\ & + \frac{\frac{\partial F_y}{\partial \delta_R} \frac{\partial \delta}{\partial F_y} \left[- \frac{\partial V_y}{\partial F_y} + R^* \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} (l_R + \Delta x) \right]}{\left[\frac{\partial V_y}{\partial F_y} - R^* \frac{\partial \omega_z}{\partial M_z} (l_1 + \Delta x) \right]} \delta_R, \end{aligned}$$

$$\left| \theta \right| \leq \frac{\pi}{2}, \left| \delta_R \right| \leq \delta_{R \max}, \left| \delta_1 \right| \leq \delta_{\max}, \left| \delta_2 \right| \leq \delta_{\max}. \quad (3)$$

Define the control line $V_y = 0$. From the second equation of system (2) we find

$$\delta_1 = -\delta_2 - \frac{dF_y}{d\theta} \frac{d\delta}{dF_y} \theta - \frac{dF_y}{d\delta_R} \frac{d\delta}{dF_y} \delta_R,$$

$$\left| \theta \right| \leq \frac{\pi}{2}, \left| \delta_R \right| \leq \delta_{R \max}, \left| \delta_1 \right| \leq \delta_{\max}, \left| \delta_2 \right| \leq \delta_{\max}. \quad (4)$$

Define the control line $\omega_z = 0$. From the third equation of system (2) we find

$$\delta_1 = \frac{(l_2 - \Delta x)}{(l_1 + \Delta x)} \delta_2 - \frac{dF_y}{d\theta} \frac{d\delta}{dF_y} \frac{(l_P + \Delta x)}{(l_1 + \Delta x)} \theta - \frac{dF_y}{d\delta_R} \frac{d\delta}{dF_y} \frac{(l_R + \Delta x)}{(l_1 + \Delta x)} \delta_R,$$

$$|\theta| \leq \frac{\pi}{2}, |\delta_R| \leq \delta_{R\max}, |\delta_1| \leq \delta_{\max}, |\delta_2| \leq \delta_{\max} \quad (5)$$

In Fig. 3 shows a control line $R = R^*$ that ensures the vessel rotation around a given pivot point, a control line $V_y = 0$ that ensures the movement of the vessel with zero drift angle, and a control line $\omega_z = 0$ that provides a straight line.

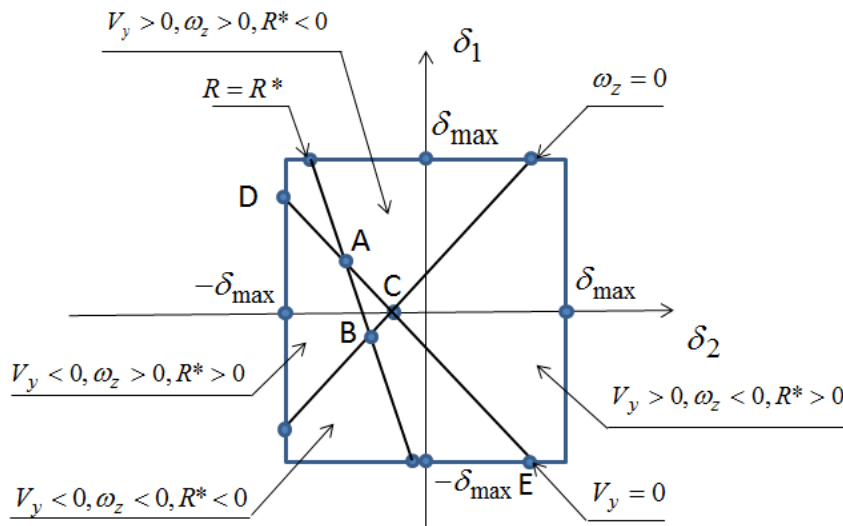


Figure 3 – Vessel control lines in the permissible control area

An experiment on automatic mooring of a vessel without drift angle using the considered method was performed on the imitation modeling stand [15–18], created by authors on the basis of Navi Trainer 5000 navigation simulator. The imitation modeling stand includes the Navi Trainer 5000 simulator itself and an additional model of the control system integrated into the local area network. The imitation modeling stand allows to develop and test the functional software of the modules of automatic control of automated systems in a closed circuit with the Navi Trainer 5000 navigation simulator, using all its possibilities, namely: swimming areas, weather conditions, training scene objects, navigation equipment, visualization channels, etc.

Conclusions. 1. Developed methods of forming controls using the concept of the pivot point to organize the movement of the vessel around the pivot point with longitudinal speed.

2. Control lines have been built to ensure the movement of the vessel with zero lateral speed and drift angle; movement of the vessel with zero angular velocity in the yaw channel; the movement of the vessel around a given position of the pivot point.

3. It is shown that the obtained control lines divide the area of permissible controls into domains in which different variants of sets of positive and negative values of lateral, angular velocity and position of the pivot point are realized.

4. Mathematical modeling of the vessel automatic mooring processes without drift angle was carried out, which confirmed the efficiency and effectiveness of the developed methods.

REFERENCES

1. Nosov P. S., Zinchenko S. M., Ben A. P., Nahrybelnyi Ya. A., Dudchenko O. M. Models of decision making by a navigator under implicit agreements with COLREG rules. Науковий вісник ХДМА. 2019. № 1 (20). С. 31–39. DOI: 10.33815/2313-4763.2019.1.20.031-039. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/531/476>
2. Nosov P., Krapyvko G., Ben A., Safonov M., Zinchenko S. Disabling the Dynamic Positioning of the Vessel as a Cause of the Negative Influence of Human Factor in Maritime Transport. 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). 2019, 24–28 April, pp. 309–315.
3. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г. Расхождение с маневрирующими целями. Науковий вісник ХДМА. 2017. № 2 (17), с. 36–43. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/555/499>.
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. 2017, 14–16 вересня, с. 230–235.
5. 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". Kherson. 2020, September 9–12, p. 326–330.
6. Зинченко С. Н., Маменко П. П., Грошева О. А. Сокращение времени численного интегрирования математической модели судна в бортовом вычислителе. Науковий вісник ХДМА. 2018. № 1 (18), с. 171–177. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>.
7. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г., Грошева О. А. Синтез оптимального управления судном с граничными условиями. Науковий вісник ХДМА. 2018. № 1 (18), с. 18–26. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
8. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г. Использование нейросетевой модели судна для решения задач управления. Науковий вісник ХДМА. 2017. № 2 (17), с. 231–237. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/587/524>
9. 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. 2017, 14–16 вересня, с. 236–240.
10. 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. 2018, 13–15 вересня, с. 78–81.
11. 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)». Херсон. 2019, 28–30 травня, с. 177–178.
12. Cherniavskiy V., Zinchenko S., Nosov P. The use of excessive actuators 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. 2021, April 29–30, pp. 466–472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>
13. 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". Kherson. 2020, September 9–12, p. 319–325.
14. 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. 2020, September 9–12, p. 108–112.

15. Zinchenko S., Mateichuk V., Nosov P., Popovych I., Solovey O., Mamenko P., Grosheva O. Use of Simulator Equipment for the Development and Testing of Vessel Control Systems. Electrical, Control and Communication Engineering. 2020, Vol. 16, No. 2, pp. 58–64. DOI: 10.2478/ecce-2020-0009. <https://sciendo.com/pdf/10.2478/ecce-2020-0009>.

16. Зінченко 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. 2018, 13–15 вересня 2018 р., с. 27–29.

17. Zinchenko S. M., Nosov P. S., Mateichuk V. M., Mamenko P. P., Grosheva O. O. Use of navigations simulators for development and testing ship control systems. 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). 2019, 24–28 April, pp. 350–355.

18. 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", Kherson, September 9–12, 2020, pp. 149–152.

19. Artyszuk J. Pivot point in ship manoeuvring. Scientific Journals Maritime University of Szczecin. 2010. Vol. 20, No 92, pp. 13–24.

Зінченко Сергій Миколайович д.т.н., доцент, доцент кафедри «Управління судном» Херсонської державної морської академії. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5012-5029>; srz56@ukr.net.

Маменко Павло Петрович к.д.н., старший викладач кафедри «Управління судном» Херсонської державної морської академії. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7358-9299>; pavlo.mamenko@gmail.com.

Носов Павло Сергійович к.т.н., доцент, доцент кафедри судноводіння та електронних навігаційних систем Херсонської державної морської академії. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5067-9766>; rason.@ukr.net.

Матейчук Вадим Миколайович старший викладач кафедри «Управління судном» Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9328-0651>; mateichukv@gmail.com.

Кириченко Костянтин Володимирович к.т.н., старший викладач кафедри «Управління судном» Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0974-6904>; kvklecturer@gmail.com.

Грошева Ольга Олексіївна старший викладач кафедри «Управління судном» Херсонської державної морської академії. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9022-4697>; olgamelyaeva@gmail.com.