

УДК 656.61.052:681.51

МІНІМІЗАЦІЯ КІНЕТИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ НЕМИНУЧОМУ ЗІТКНЕННІ СУДЕН

Зінченко С.М., Кириченко К.В., Маменко П.П., Матейчук В.М.

*Херсонська держава морська академія
(Україна)*

Вступ. За останні 10-20 років значно зросла інтенсивність навігації та швидкість суден, а разом з ними збільшився і потік інформації. Судноводіям стає все важче знаходити правильні управлінські рішення, особливо в критичних ситуаціях, що є причиною збільшення кількості аварій на морському транспорті. Статистика аварій у світовій морській індустрії свідчить, що 75% всіх аварій відбувається з вини людського фактора. Тому, на думку експертів, значного зниження аварійності можна досягти лише за рахунок зменшення людського втручання в управління, а саме за рахунок створення автоматизованих систем підтримки прийняття рішень, ергатичних систем та автоматизованих систем з модулями автоматичного керування. Системи підтримки прийняття рішень контролюють роботу окремих навігаційних модулів і, якщо робочі параметри модулів виходять за допустимі межі, видають попереджувальні повідомлення або навіть дають «пораду» щодо того, як керувати судном. Капітан судна повинен обробити отриману інформацію, перш ніж прийняти рішення, що також потребує часу. У зв'язку з цим особливої уваги заслуговують автоматизовані системи керування з автоматичними модулями, коли людський фактор максимально виключений із контуру керування [1-27]. У цьому випадку навігатор лише приймає рішення про активацію автоматичного режиму керування і спостерігає за його роботою. Питання зменшення збитків при неминучому зіткненні суден розглядалося також у попередніх роботах авторів [1, 2].

Актуальність дослідження. У даному дослідженні розроблено математичне забезпечення модуля автоматичного керування рухом судна при неминучому зіткненні, коли стрес не є найкращим порадиником штурмана. Проведений аналіз літературних джерел показав, що такі питання раніше не розглядалися. Тому, розробка методів, алгоритмічного та програмного забезпечення автоматичних модулів керування рухом суден у випадках неминучого зіткнення є актуальною науково-технічною задачею.

Постановка проблеми. Необхідно розробити метод, алгоритмічне та програмне забезпечення модуля автоматичного керування рухом судна автоматизованої системи, які дозволили б мінімізувати кінетичну енергію зіткнення судна і цілі у випадку, коли уникнути даного зіткнення неможливо.

Результати дослідження. Кінетична енергія зіткнення суден може бути розрахована за формулою

$$K = m \frac{(V \cos \Delta\varphi)^2}{2} \quad (1)$$

Як видно із (1), кінетична енергія зіткнення залежить від двох параметрів, що підлягають керуванню: швидкості власного судна V та різниці курсів $\Delta\varphi$. Мінімальне значення кінетичної енергії $K = 0$ досягається при значенні цих параметрів $V = 0$ та/або $\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2} + \pi n$.

Ідея методу полягає у організації найшвидшого зменшення кінетичної енергії (1) по градієнту у напрямку мінімального значення $K = 0$ шляхом розрахунку відповідних параметрів руху V , $\Delta\varphi$ та подальшої їх реалізації засобами системи керування.

На рис. 1 зображена схема взаємного зближення суден.

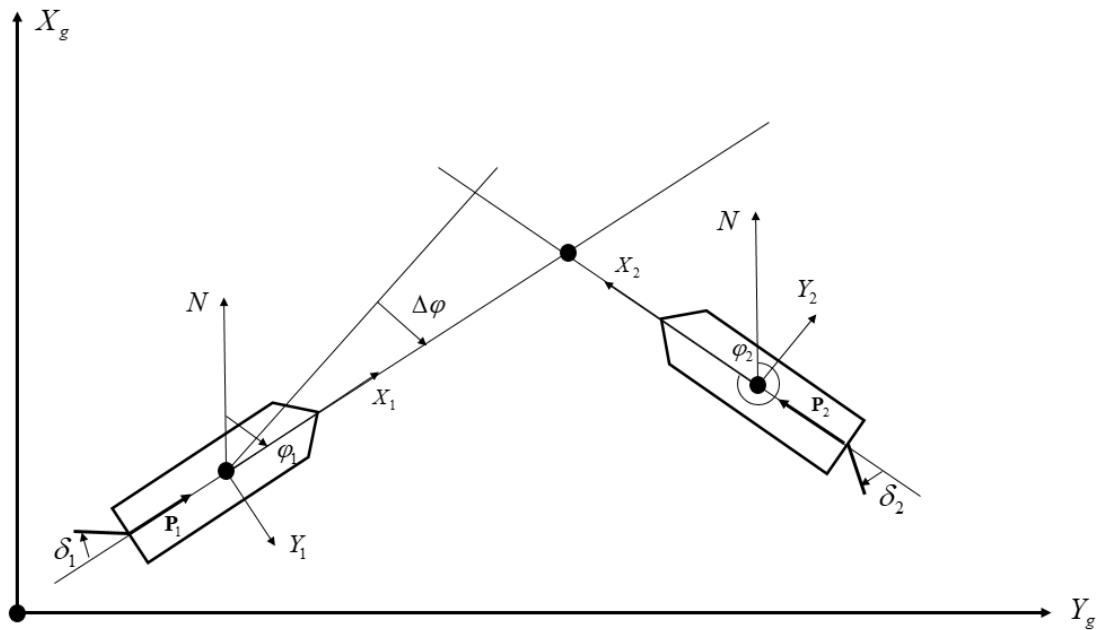


Рисунок 1 – Схема взаємного зближення суден

Гradient функції (1) по параметрам руху V , $\Delta\varphi$ має вигляд

$$\text{grad}K = \left(\frac{\partial K}{\partial V}, \frac{\partial K}{\partial \Delta\varphi} \right) = \frac{m}{2} (2V \cos \Delta\varphi, -2V^2 \cos \Delta\varphi \sin \Delta\varphi) \quad (2)$$

У початковий момент часу

$$\text{grad}K(0) = \frac{m}{2} (2V(0) \cos \Delta\varphi(0), -2V(0)^2 \cos \Delta\varphi(0) \sin \Delta\varphi(0)) \quad (3)$$

Для забезпечення заданого напрямку $\text{grad}K(0)$ зменшення кінетичної енергії на наступних тактах обчислення, потрібно виконання умови

$$\frac{\text{grad}_y K}{\text{grad}_x K} = -V(0) \sin \Delta\varphi(0) = \text{const} = C(0) \quad (4)$$

Із врахуванням (4), отримуємо

$$\sin \Delta\varphi(n) = -\frac{C(0)}{V(n)} \quad (5)$$

Рівняння (5) накладає одне обмеження на два параметри руху V , $\Delta\varphi$, тобто існує нескінченна кількість варіантів зменшення кінетичної енергії (1) по gradientу (2) і поставлена задача є оптимізаційною. Проте, вирішення оптимізаційних задач пов'язане із можливими ризиками поганої збіжності методів пошуку або навіть у неможливості знаходження оптимального рішення. Тому, у даному дослідженні розглядається один із можливих варіантів керування з активним гальмуванням, що дозволяє знайти кінцеві формули визначення керувань.

Лінеаризована система лінійного та кутового руху судна може бути записана у вигляді

$$\begin{cases} m\dot{V} = \frac{\partial P(\Theta)}{\partial \Theta} \Theta - \frac{\partial Q(V)}{\partial V} V \\ I_z \dot{\omega}_z = \frac{\partial M_z(\delta)}{\partial \delta} \delta - \frac{\partial M_z(\omega_z)}{\partial \omega_z} \omega_z \\ \dot{\varphi} = \omega_z \end{cases} \quad (6)$$

або у дискретній формі, для методу Ейлера

$$\begin{cases} V(n) = V(n-1) + \frac{\Delta t}{m} \left[\frac{\partial P(\Theta)}{\partial \Theta} \Theta(n-1) - \frac{\partial Q(V)}{\partial V} V(n-1) \right] \\ \omega_z(n) = \omega_z(n-1) + \frac{\Delta t}{I_z} \left[\frac{\partial M_z(\delta)}{\partial \delta} \delta(n-1) - \frac{\partial M_z(\omega_z)}{\partial \omega_z} \omega_z(n-1) \right] \\ \Delta \varphi(n) = \Delta \varphi(n-1) + \Delta t \omega_z(n-1) \end{cases} \quad (7)$$

При активному гальмуванні $\Theta(n) = -\Theta^{\max}$, із першого рівняння системи (7) отримуємо рекурентну формулу для оцінки швидкості судна на наступному кроці обчислення

$$V(n+1) = V(n) + \frac{\Delta t}{m} \left[\frac{\partial P(\Theta)}{\partial \Theta} (-\Theta^{\max}) - \frac{\partial Q(V)}{\partial V} V(n) \right] \quad (8)$$

Із рівняння (5) знаходимо відповідне значення $\Delta \varphi^*(n)$, що забезпечить скидання кінетичної енергії по градієнту $gradK$

$$\Delta \varphi^*(n+1) = -\arcsin \left\{ \frac{C(0)}{V(n+1)} \right\}, n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

Із другого та третього рівняння системи (7) також знаходимо оцінку $\Delta \varphi(n+1)$, яку прирівнюємо до $\Delta \varphi^*(n+1)$, $\Delta \varphi^*(n+1) = \Delta \varphi(n+1)$, $n = 1, 2, \dots, N$

$$\Delta \varphi^*(n+1) = \Delta \varphi^*(n) + \omega_z(n) \Delta t + \frac{\Delta t^2}{I_z} \left[\frac{\partial M_z}{\partial \delta} \delta(n) - \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z(n) \right] \quad (10)$$

Із рівняння (10) знаходимо необхідне відхилення керма на поточному такті обчислення n

$$\delta(n) = \frac{\partial \delta}{\partial M_z} \left[\frac{I_z}{\Delta t^2} \left[\Delta \varphi^*(n+1) - \Delta \varphi^*(n) - \omega_z(n) \Delta t \right] + \frac{\partial M_z}{\partial \omega_z} \omega_z(n) \right] \quad (11)$$

Як видно із рівняння (11), для обчислення $\delta(n)$ на поточному кроці використовуються прогнозовані значення $\Delta \varphi^*(n+1)$ наступного кроку обчислення, які розраховуються за формулою (9) з використанням прогнозованої швидкості $V(n+1)$ із формули (8). Щоб похибка прогнозування із часом не збільшувалася, доцільно у формулі (8) використовувати вимірне значення швидкості на поточному кроці обчислення $V(n) = V_m(n)$.

Таким чином, для забезпечення найшвидшого скидання кінетичного моменту, необхідно телеграф встановити у положення $\Theta(n) = -\Theta^{\max}$, а відхилення стерна визначати за формулою (11).

Експеримент. Для перевірки працездатності та ефективності методу, алгоритмічного і програмного забезпечення модуля автоматичного керування рухом судна при неминучому зіткненні із ціллю, проведено експеримент на стенді імітаційного моделювання [24-29], створеного авторами на базі навігаційного тренажеру Navi Trainer 5000. Стенд імітаційного моделювання дозволяє відпрацьовувати програмне забезпечення модулів системи керування у замкнутій схемі з навігаційним тренажером, використовуючи усі його переваги. Результати моделювання підтвердили ефективність та працездатність методу, алгоритмічного та програмного забезпечення модуля оптимального керування рухом судна, що мінімізує збитки у випадках неминучого зіткнення.

Висновки. Розглянуті питання автоматичного керування рухом судна у випадку неминучого зіткнення із ціллю з метою мінімізації пошкоджень.

1. Запропоновано проводити скидання кінетичної енергії зіткнення по градієнту. Визначено градієнт кінетичної енергії зіткнення, як функцію параметрів руху - швидкості власного судна та різниці курсів судна і цілі.
2. Отримано формулу залежності параметрів руху, що забезпечує скидання кінетичної енергії зіткнення по градієнту, показано, що дана задача може розглядатися також як оптимізаційна.
3. Розглянуто один із приватних випадків вирішення задачі, який полягає у визначенні додаткового обмеження – використання активного гальмування, що дозволило знайти кінцеві формули розрахунку відхилення керма.
4. Для запропонованого методу скидання кінетичної енергії зіткнення по градієнту розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для модуля автоматичного керування рухом судна у випадках неминучого зіткнення.
5. Працездатність та ефективність методу, алгоритмічного та програмного забезпечення перевірені математичним моделюванням у замкнутій схемі із навігаційним тренажером Navi Trainer 5000.

REFERENCES

1. Kyrychenko K.V., Zinchenko S.M., Nosov P. S. Minimizing damage in the event of imminent collision. Proceedings of the I International scientific-practical conference «Current transport safety issues, in energy, infrastructure (STEI-2021)», 2021, pp. 234-238.
2. Kyrychenko K.V., Grosheva O.O., Tovstokoryi O.M., Mateichuk V.M., Moiseenko V.S., Mamenko P.P. Solving the problem of minimization damage in the event of imminent collision. Materials of the Ith international scientific and practical conference «Problems of sustainable development of the marine industry (PSDMI-2021)», 2021, pp. 112-115.
3. 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>
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 2017р., с. 230-235
5. 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

6. 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>
7. 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>
8. 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>
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 а виробництві освіта, наука, практика», Херсон, 14-16 вересня 2017р., 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, 13-15 вересня 2018р., 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)», 28-30 травня 2019р., Херсон с. 177-178
12. 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
13. 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>
14. 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
15. 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-ISTANBUL-ODESSA. <https://drive.google.com/file/d/1HEX2RVuA1KV5JjMfQcqYZ1f4SCFMcy6a/view>
16. 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.
17. Zinchenko S., Tovstokoryi O. 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

18. 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, Jelezny Port.
19. 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>
20. 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, Jelezny Port.
21. 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
22. 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.
23. 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.
24. Cherniavskiy V.V., Zinchenko S.M., Nosov P.S. 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, April 29-30, 2021, p. 466-472. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36574.15681>
25. 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.
26. Зинченко С.Н., Гарболинская О.И., Шалаева А.А. Создание упрощенной математической модели судна для решения прикладных задач управления // Матеріали Х МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», Херсон, 29-31 травня 2018р., с.208-211
27. Зинченко С.Н., Ляшенко В.Г. Оптимальное управление судном при подходе к объекту швартови // Матеріали Х МНПК «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», Херсон, 29-31 травня 2018р., с.56-59