

## АНАЛІТИЧНА МОДЕЛЬ ОСТІЙНОСТІ СУДНА

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

\*Херсонська державна морська академія  
(Україна)

**Вступ.** Одним із важливих питань безпеки судноплавства є зниження та втрата остійності суден на попутному хвилюванні. Дослідженнями встановлено, що найбільшу небезпеку для суден становить зустріч із хвилею, довжина якої співпадає з довжиною судна. Коли судно знаходиться на вершині хвилі (гребень хвилі співпадає з мідельшпангоутом), складові відновлювального моменту носової і кормової частини корпусу діють у сторону нахилу, намагаючись збільшити його. Для реагування на небезпеку, відповідно до існуючих рекомендацій, наприклад, [1–4], спочатку потрібно її ідентифікувати, що вже є складною технічною задачею, так як крім небезпеки втрати остійності існують й інші небезпеки, що можуть привести до перевертання судна або руйнування корпусу. Автори статті вважають, що найбільш радикальним напрямком уникнення небезпек є застосування автоматизованих систем, або автоматичних модулів керування в автоматизованих системах. Приклади застосування таких систем і модулів, для вирішення ряду задач, наведені, наприклад, у роботах авторів [5–19].

**Актуальність дослідження.** Ефективна робота автоматизованих та автоматичних систем забезпечується математичними моделями об'єктів або процесів, які повинні мати достатню швидкодію для можливості їх використання у реальному часі. Для задач автоматичного уникнення втрати остійності, потрібна математична модель остійності судна. Тому, розробка такої моделі є актуальною науково – технічною задачею.

**Постановка задачі.** На рис. 1 зображена бокова проекція корпусу судна на регулярному хвилюванні.

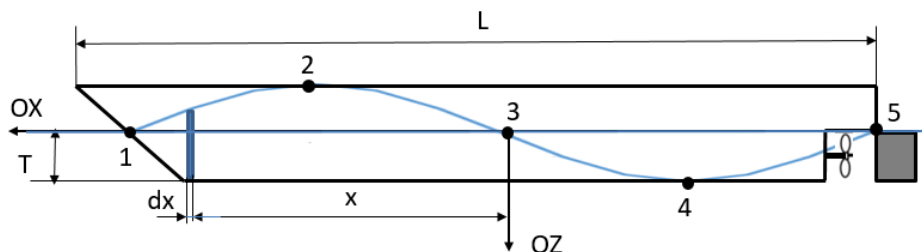


Рисунок 1 – Бокова проекція корпусу судна на регулярному хвилюванні

Показана зв'язана із судном система координат OXYZ (ЗСК). Задано геометричні розміри судна: довжина  $L$ , ширина  $B$ , висота  $H$ ; параметри занурення: осадка  $T$ , кут крену  $\theta$ ; параметри регулярного хвилювання: довжина хвилі  $\lambda$ ; параметри руху: швидкість судна  $V$  та кут набігання хвилі  $q$  на діаметральну площину.

Необхідно отримати аналітичні залежності відновлювального моменту  $M_x$  у каналі крену від вказаних параметрів для використання у бортовому обчислювачі, з метою оцінювання остійності у реальному часі в алгоритмах автоматичного керування

$$M_x = f(L, B, H, T, \theta, \lambda, V, q) \quad (1)$$

**Результати дослідження.** Математична модель наведеної на рис. 1 структури має вигляд Глибина занурення елемента корпусу судна  $dx$ , який знаходиться на відстані  $x$  від центру обертання, рис.1, можна записати у вигляді

$$z = T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta(t)\right), \quad (2)$$

Фаза хвилі відносно ЗСК судна може бути представлена у вигляді

$$\Delta(t) = \frac{\partial \Delta}{\partial t} t = \frac{2\pi}{T_E} t = \frac{2\pi}{\lambda} (C + V \cos q) t, \quad (3)$$

На рис. 2 зображено поперечний переріз корпусу судна, що знаходиться на відстані  $x$  від початку координат.

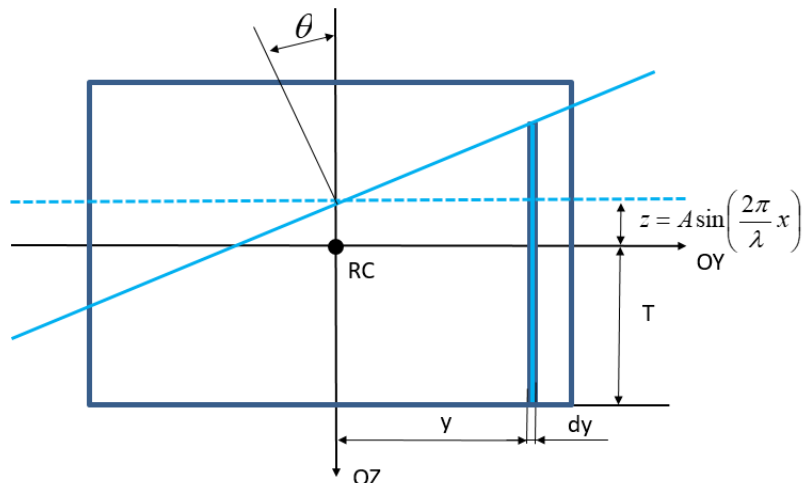


Рисунок 2 – Поперечний переріз корпусу судна, поверхня хвилі проходить через борти судна

Відновлювальний моменту  $m_x$  бокового перерізу судна шириною  $dx$  знаходимо інтегруванням зануреної частини корпусу по  $dy$  в межах ширини корпусу.

$$\begin{aligned} m_x &= \rho g dx \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} z y dy = \rho g dx \left( \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \left( T + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) + y \operatorname{tg} \theta \right) y dy \right) = \\ &= \rho g dx \left( \frac{T}{2} y^2 + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) y^2 + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} y^3 \right) \Big|_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} = \\ &= \rho g dx \left( \frac{T}{2} \left( \frac{B^2}{4} - \frac{B^2}{4} \right) + \frac{A}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x + \Delta\right) \left( \frac{B^2}{4} - \frac{B^2}{4} \right) + \frac{\operatorname{tg} \theta}{3} \left( \frac{B^3}{8} + \frac{B^3}{8} \right) \right) = \rho g dx \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 \end{aligned} \quad (4)$$

Повний відновлювальний момент корпусу судна визначаємо шляхом інтегрування виразу (5) по довжині судна

$$M_x = \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} m_x dx = \rho g \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 x \Big|_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} = \rho g \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 \left( \frac{L}{2} + \frac{L}{2} \right) = \rho g \frac{\operatorname{tg} \theta}{12} B^3 L \quad (5)$$

Знайдені також аналітичні вирази розрахунку відновлювального моменту для інших ситуацій перетину корпусу судна хвилею.

Для перевірки працездатності розробленої моделі, проведено обчислювальний експеримент, результати якого наведено на рис. 3.

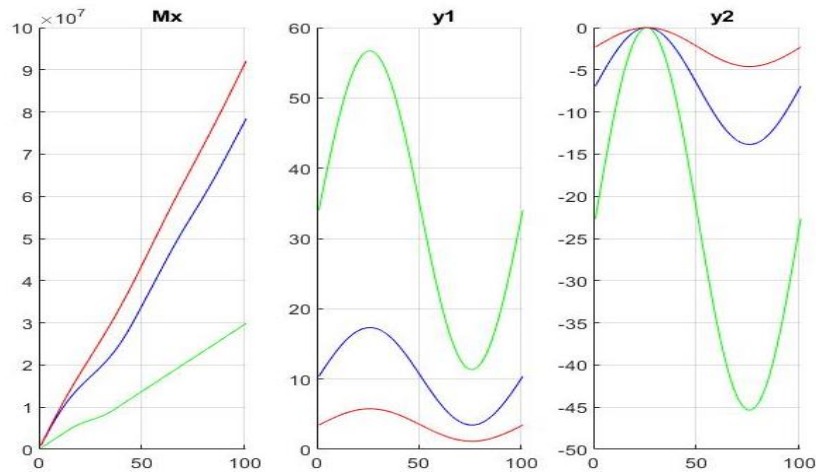
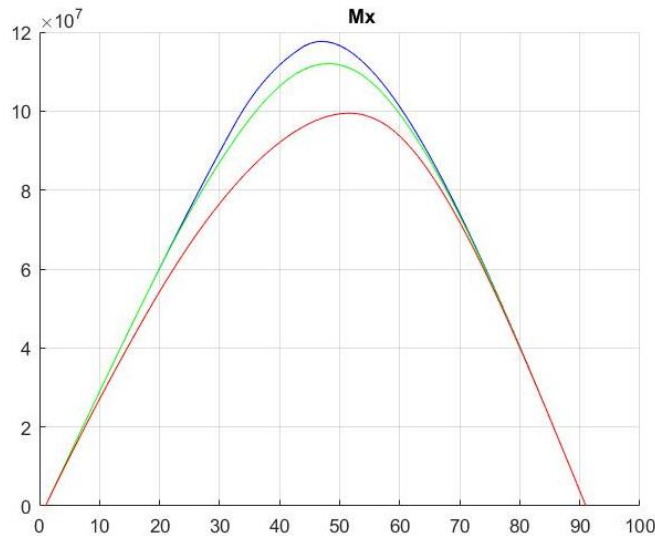


Рисунок 3 – Результати обчислювального експерименту

На графіках зображено зміну відновлювального моменту  $M_x$  під час інтегрування по довжині судна, залежність  $y_1(x)$  положення точки перетину поверхні хвилі із палубою судна від координати  $x$  перерізу та залежність  $y_2(x)$  положення точки перетину поверхні хвилі із днищем судна від координати  $x$  перерізу для кутів крену  $\theta = 10\text{град}$  (зелена крива),  $\theta = 30\text{град}$  (синя крива) та  $\theta = 60\text{град}$  (червона крива). Залежності відновлювального моменту  $M_x$  від кута крену  $\theta$  для амплітуд хвилі  $A = 0\text{м}$  (синій графік),  $A = 2\text{м}$  (зелений графік) та  $A = 4\text{м}$  (червоний графік) наведені на рис. 4.

Рисунок 4 – Залежності відновлювального моменту  $M_x$  від кута крену  $\theta$  для амплітуд хвилі  $A = 0\text{м}$ ,  $A = 2\text{м}$ ,  $A = 4\text{м}$ 

**Висновки.** Розроблено аналітичну модель обчислення відновлювального моменту у каналі крену судна для регулярного хвилювання, у залежності від геометричних розмірів корпусу судна, параметрів занурення, параметрів руху судна та параметрів хвилювання. Отримані результати відрізняються від відомих рішень тим, що мають аналітичний вигляд. Вони є відтворюваними і можуть використовуватися для дослідження остійності судна на хвилюванні, а також у бортовому обчислювачі автоматизованої або автоматичної системи. Працездатність моделі підтверджена обчислювальним експериментом.

Теоретичне значення отриманих результатів полягає у розробці аналітичної моделі обчислення відновлювального моменту у каналі крену судна на регулярному хвилюванні.

Практичне значення отриманих результатів полягає у: перевірці працездатності розробленої моделі під час проведення обчислювального експерименту; можливості її

використання у бортовому обчислювачі автоматизованої або автоматичної системи керування, для оцінювання характеристик остійності судна у реальному часі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Recommendation on intact stability for passenger and cargo ships under 100 meters in length, IMCO RESOLUTION A.167 (ES.IV) adopted on 28 November 1968.
2. Guidance to the master for avoiding dangerous situations in following and quartering seas, IMO MSC/Circ.707. Ref. T1/2.04/ (1995).
3. Recommendation on a severe wind and rolling criterion (weather criterion) for the intact stability of passenger and cargo ships of 24 meters in length and over, IMO RESOLUTION A.562(14) adopted on 20 November 1985.5.
4. Revised guidance to the master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions, IMO MSC.1/Circ.1228 (2007), 8 p.
5. 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>.
6. 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.
7. 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>.
8. 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.
9. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г., Грошева О. А. Синтез оптимального управления судном с граничными условиями // Науковий вісник ХДМА №1(18), 2018 <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/502/440>.
10. 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 2018 р., с. 27–29.
11. Зинченко С. Н., Маменко П. П., Грошева О. А. Сокращение времени численного интегрирования математической модели судна в бортовом вычислителе // Науковий вісник ХДМА №1(18), 2018. <http://journals.ksma.ks.ua/nvksma/article/view/526/469>.
12. Зинченко С. Н., Ляшенко В. Г., Грошева О. А. Оптимальное управление избыточными структурами аzipодов // Матеріали V МНПК «Безпека життєдіяльності на транспорті та виробництві: освіта, наука, практика», Херсон, 13–15 вересня 2018 р., с. 78–81.
13. 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>.
14. Зинченко С. Н., Носов П. С., Маменко П. П., Грошева О. А., Матейчук В. Н. Использование математической модели чувствительного элемента 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. Zinchenko Serhii, Tovstokoryi Oleh, Nosov Pavlo, Popovych Ihor & Kyrychenko Kostiantyn. Pivot Point position determination and its use for manoeuvring a vessel, Ships and Offshore Structures, 2022, DOI: 10.1080/17445302.2022.2052480.

16. 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.

17. 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>.

18. 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>.

19. 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, September 9–12, 2020, p. 319–325.