

151 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 681.51:656.61.052

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300064

© Хлопенко М.Я.¹, Поливода В.В.², Шарко О.В.³, Онишко Д.М.⁴

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ УНИКНЕННЯ СЛЕМІНГУ СУДНА

Об'єктом дослідження є процеси автоматичного уникнення слемінгу при плаванні судна в шторм. Під час штормового плавання на судно діють зовнішні впливи від вітру та хвилювання, які призводять до сильних динамічних навантажень на корпус, збільшення кутів крену і диференту, zalivanja палуби. Знижується швидкість судна, погіршується його керованість. Одним із найнебезпечніших явищ при штормовому плаванні є слемінг. Поява слемінгу залежить від багатьох факторів: розмірів та форми корпусу судна, осадки носової частини корпусу, стану моря, курсу і швидкості судна. Слемінг характеризується ударами носової частини та днища корпусу судна об воду при русі назустріч хвилям, довжина яких приблизно дорівнює довжині судна. Удари супроводжуються здриганням корпусу, внаслідок різкого збільшення навантаження на днище, і повільно загасаючою вібрацією. Гідродинамічні удари по днищу і загальна вібрація є причинами порушення місцевої і загальної міцності корпусу. Слемінг та інші небезпеки штормового плавання є причиною сильного психоемоційного напруження судноводіїв, сприяє накопиченню втоми, що є передумовою аварій. У роботі розроблено метод автоматичного керування судном для запобігання слемінгу. Отримані результати пояснюються використанням бортового обчислювача, побудовою у бортовому обчислювачі небезпечної області слемінгу, використанням градієнтного методу знаходження оптимальної у часі траєкторії виводу фазової точки із небезпечної області, підтриманням засобами автоматичної системи керування оптимальної траєкторії. Використання розробленого методу дозволяє автоматично уникати слемінгу, зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити виснаженість екіпажу, зменшити ризики втрати судна і вантажу, підвищити безпеку судноплавства. Розроблений метод може використовуватися на судах, за умови інтегрування в існуючу автоматизовану систему бортового обчислювача для вирішення задачі автоматичного уникнення слемінгу під час штормового плавання.

Ключові слова: інтелектуальні системи транспорту, автоматичне керування, навігаційна безпека, людський чинник, слемінг, фазова точка.

M. Khlopenko, V. Polyvoda, O. Sharko, D. Onyshko. Automation of vessel slamming avoidance processes. The object of the research is the processes of slamming automatic avoidance when the vessel is sailing in a storm. During stormy sailing, the vessel is subjected to external influences from wind and waves, which lead to strong dynamic loads on the hull, increase in heel and trim angles, flooding of the deck. The vessel's speed decreases,

¹ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7773-4721, khlopenko.mykola@ksma.ks.ua

² канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-7742-255X, polyvodavv@gmail.com

³ д-р техн. наук, професор, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0000-0001-6400-8528, sharko.oleksandr@ksma.ks.ua

⁴ ст. викладач, Херсонська державна морська академія, м. Херсон, ORCID: 0009-0005-8394-3091, onushkodn@gmail.com

its controllability deteriorates. Slamming is one of the most dangerous phenomena in storm sailing. The appearance of slamming depends on many factors: the size and shape of the vessel's hull, the draft of the bow, the state of the sea, the vessel's course and speed. Slamming is characterized by impacts of the bow and the bottom of the vessel's hull against the water when moving towards waves, the length of which is approximately equal to the length of the vessel. Impacts are accompanied by body shaking, due to a sharp increase in the load on the bottom, and a slowly fading vibration. Hydrodynamic shocks on the bottom and general vibration are the reasons for the violation of the local and general strength of the hull. Slamming and other dangers of stormy sailing are the cause of strong psycho-emotional stress of boatmen, contribute to the accumulation of fatigue, which is a prerequisite for accidents. In the article, a method of automatic control of the vessel to prevent slamming was developed. The obtained results are explained by the use of an on-board computer, the construction of a dangerous area of slamming in on-board computer, the use of a gradient method of finding the optimal trajectory in time of the phase point output from the dangerous area, and the maintenance of the optimal trajectory by means of an automatic control system. The use of the developed method allows you to automatically avoid slamming, reduce the influence of the human factor on control processes, reduce crew fatigue, reduce the risks of losing the ship and cargo, and increase the safety of navigation. The developed method can be used on vessels, provided it is integrated into the existing automated system of the on-board computer to solve the problem of automatic avoidance of slamming during stormy sailing.

Key words: *intelligent transport systems, automatic control, navigational safety, human factor, slamming, phase point.*

Постановка проблеми. Під час штормового плавання на судно діють зовнішні впливи від вітру та хвилювання, які призводять до сильних динамічних навантажень на корпус, збільшення кутів крену і диференту, заливання палуби. Знижується швидкість судна, погіршується його керованість. Одним із найнебезпечніших явищ при штормовому плаванні є слемінг. Поява слемінгу залежить від багатьох факторів: розмірів та форми корпусу судна, осадки носової частини корпусу, стану моря, курсу і швидкості судна. Слемінг характеризується ударами носової частини та днища корпусу судна об воду при русі назустріч хвилям, довжина яких приблизно дорівнює довжині судна. Зовнішнім проявом ударів є утворення потужних бризок води вздовж борта, що падають на палубу. Удари супроводжуються здриганням корпусу, внаслідок різкого збільшення навантаження на днище корпусу, і повільно загасаючою вібрацією. Існує також незатухаюча вібрація, викликана збудженням згинальних коливань корпусу під впливом періодично змінюваних гідродинамічних тисків на зустрічному хвилюванні. Гідродинамічні удари по днищу і загальна вібрація є причинами порушення місцевої і загальної міцності корпусу. Пошкодження зазвичай розвиваються повільно у вигляді накопичення пластичних деформацій обшивки та елементів, що формують обводи корпусу. Рух судна в шторм може супроводжуватися також додатковим попаданням великих мас води на палубу. Це відбувається зазвичай через носову частину корпусу судна при наявності зустрічного вітру. Таке затоплення вважається сильним, коли водою покривається до 15% довжини судна і більше. Якщо хвилі досягають лінії палуби в будь-якій точці корпусу і лише деякі з них перевищують її, то затоплення вважається помірним. Штормові умови є причиною сильного психоемоційного напруження вахтових помічників та команди в цілому, сприяють накопиченню втоми, що є передумовою аварій. Автори статті вважають, що найбільш перспективним напрямком боротьби зі слемінгом є використання автоматичних модулів керування рухом судна у автоматизованій системі. Це дозволить автоматично уникати слемінгу, пов'язаних з ним пошкоджень корпусу, втрати судна і вантажу, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку судноплавства. Тому, розробка таких автоматичних модулів керування є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слемінг, як феномен, привертає значну увагу вчених та фахівців у галузі судноплавства. Дослідження, опубліковані в останні роки, зосереджені на різноманітних аспектах цього явища, спрямованих на розуміння та покращення безпеки судноплавства.

У роботі [1] описані фізичні процеси взаємодії судна і хвиль під час слемінгу. Розглянуті основні підходи до вивчення явища слемінгу: теорія імпульсу, яка використовувалася Лейбовіцем, Карманом, Пабстом; метод граничних елементів, розроблений для двовимірних впливів Грінхов (Greenhow) та Лін (Lin). Метод граничних елементів дозволяє отримати прийнятне рішення при незначних обчислювальних затратах. Недоліком методу автор називає фундаментальну проблему числового рішення, яка полягає у розриві потенціалу швидкості, що призводить до виникнення нескінченного тиску. Ця проблема пізніше була вирішена Огілві, який запропонував враховувати стисливість рідини; модель тривимірного слемінгу (теорія смуг) вперше запропонована Жао (Zhao) та у подальшому досліджувалася Квалсволдом (Kvålsvold), Самесом та ін., які практично довели, що кут нахилу судна має значний вплив на результуючу силу удару; статистичний метод Очі (Ochi). Використовувався для прогнозування ймовірності донного слемінгу. Ймовірність оцінювалася з використанням розподілу Релея. Недоліком методу було припущення, що перетин судна повинен повністю виходити із води а потім ударятися об воду. Метод виявився простим у використанні, що зробило його популярним; аналітичний метод Вагнера. Для знаходження рішення удару клину у плоску водну поверхню використана теорія потенціалу. Удосконалено наближений розв'язок задачі Добровольської удару клинів у вільну поверхню, відомий як рішення подібності. Також автором статті описані теми: Computational fluid dynamics, Structural aspects: hydroelasticity, Experimental techniques, Full-scale measurements.

У роботах [2-4] досліджувалися питання слемінгу під час випробувань на дослідницькому судні полярного класу у відкритій воді. Для оцінювання використовувалися підрахунок циклу, закон Майнера та часовий ряд деформації. Враховувалися низькочастотний та високочастотний хвильовий згин. Високочастотний хвильовий згин фіксувався шляхом вимірювання прискорення з подальшою обробкою алгоритмом виявлення слемінгу і операційного модального аналізу. Сильний слемінг спостерігався для хвиль, що ударялися в корму стоячого судна. У порівнянні із зустрічними хвилями, 14-кратне збільшення кількості ударів при попутному хвилюванні завдає у 46,3 разів більшої шкоди, причому в цій шкоді переважають збудження від вигину через удари.

Статті [5-6] присвячені розгляду механізмів виникнення слемінгу. Дослідження вказують на важливість врахування таких факторів, як форма хвиль, швидкість вітру та геометрія корпусу судна, для прогнозування і попередження виникнення цього явища.

В рекомендаціях [7] наведені експлуатаційні вимоги боротьби зі слемінгом за несприятливих погодних умов, описані критерії, що базуються на концепціях надійного проектування, інженерії та досвіду.

В публікації [8] розглянуті причини виникнення слемінгу, наведені рекомендації судноводіям щодо ефективних дій для його уникнення. Описано порядок підготовки судна до плавання в складних погодних умовах.

У роботі [9] досліджується вплив слемінгу на фізичну та емоційну втому екіпажу. Розглядаються аспекти, пов'язані з прийняттям рішень в умовах стресу та несприятливих погодних умов.

У статтях [10-15] наводяться математичні моделі та симуляції, які дозволяють більш точно передбачати вплив слемінгу на судно. Публікації включають використання числових методів та комп'ютерних програм для аналізу взаємодії судна з хвильовими полями.

В цілому, публікації останніх років свідчать про активний інтерес до проблеми слемінгу, а також націлені на розробку практичних рішень для підвищення безпеки та ефективності судноплавства в умовах штормів. Але всі наведені джерела не містять підходів щодо автоматичного розрахунку оптимальних параметрів керування рухом судна для уникнення слемінгу.

Метою статті є розробка методу, алгоритмічного та програмного забезпечення модуля автоматичного уникнення слемінгу, що дозволить автоматично контролювати область з підвищеною вірогідністю появи слемінгу, зменшити ризики втрати судна і вантажу, зменшити вплив людського чинника на процеси керування, зменшити виснаженість екіпажу, підвищити безпеку судноплавства.

Виклад основного матеріалу. Практичними спостереженнями встановлено, що слемінг виникає на зустрічному хвилюванні, коли довжина хвилі приблизно дорівнює довжині судна,

швидкість судна перевищує допустиму V_{sl} і курсові кути хвилі знаходяться у секторі $\pm 45^{\circ}$. Запишемо ці умови у вигляді системи нерівностей

$$\begin{cases} V_{sl} < V < V_{\max} \\ |q| \leq 45 \\ L \approx \lambda \end{cases}, \quad (1)$$

де V_{sl} – швидкість судна, при якій виникає слемінг, V_{\max} – максимальна швидкість судна, L – довжина судна, λ – довжина хвилі.

На рис. 1 побудована область слемінгу 1-2-3-4 у координатах " $V \sin q - V \cos q$ " із врахуванням умов системи (1). Якщо фазова точка А (поточне положення судна, виражене у координатах " $V \sin q - V \cos q$ "), рис. 1, попадає в область слемінгу, то можливими варіантами виходу із небезпечної області є маневр курсом, маневр швидкістю або комбінований маневр курсом і швидкістю. При маневрі курсом вправо або вліво, фазова точка А буде рухатися по колу, зображеному штриховою лінією, вздовж області слемінгу, що збільшує час знаходження у небезпечній зоні. При маневруванні швидкістю, фазова точка буде рухатися по радіусу даного кола, що у декілька разів зменшує довжину траєкторії виходу за межі небезпечної області. Маневр швидкістю можливий лише шляхом зменшення швидкості до $V < V_{sl}$. Збільшення швидкості не дозволяє вийти із небезпечної області, так як вона охоплює діапазон швидкостей від швидкості виникнення слемінгу V_{sl} до максимальної V_{\max} . При комбінованому маневруванні, фазова точка рухатиметься по траєкторії, довжина якої більша довжини траєкторії при маневруванні швидкістю, але менша довжини траєкторії при маневруванні курсом.

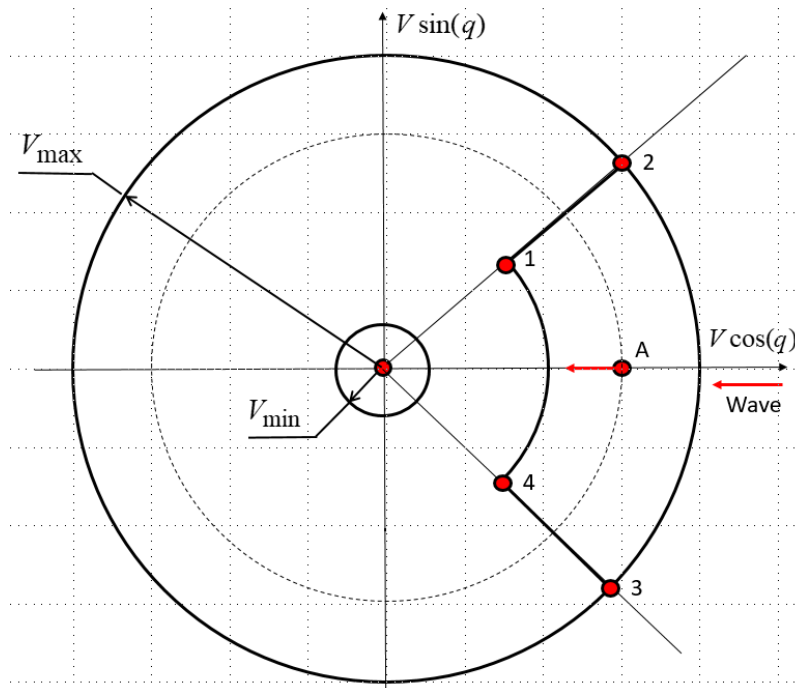


Рис. 1 – Область слемінгу 1-2-3-4 у координатах " $V \sin q - V \cos q$ "

У роботі [6] автором наведена діаграма частоти виникнення слемінгу $f(V, q)$, рис. 2, у залежності від швидкості судна V та курсового кута хвилі q .

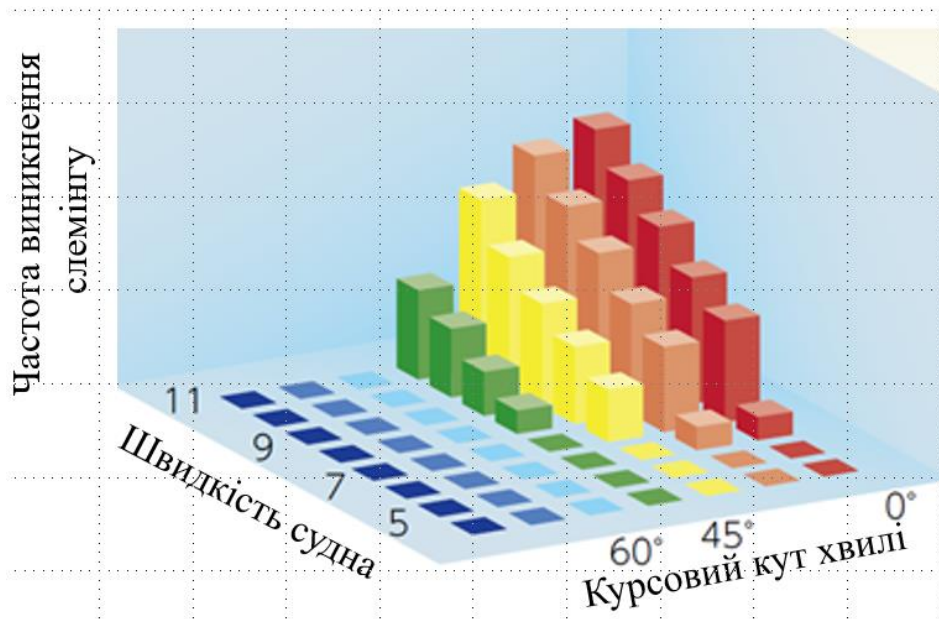


Рис. 2 – Діаграма частоти виникнення слемінгу

Дана діаграма містить більше інформації у порівнянні із діаграмою рис. 1, так як на ній додатково наведені дані про розподіл небезпеки (частоту виникнення слемінгу) всередині самої області. Дану інформацію можна використовувати для побудови більш ефективних алгоритмів. Для цього спочатку потрібно апроксимувати числові дані по частоті виникнення слемінгу, отримані для конкретного судна, випуклою функцією, наприклад,

$$f(V, q) = a_1V^2 + a_2V + b_1q^2 + b_2q. \quad (2)$$

Апроксимація (2) частоти виникнення слемінгу залежить від параметрів руху $T = (V, q)$. У такому випадку, задача керування зводиться до знаходження оптимальної у часі траєкторії $T(V^*, q^*)$ виходу із небезпечної області, на якій мінімізується цільова функція

$$f(V^*, q^*) = \min_{T(V, q)} f(V, q). \quad (3)$$

Траєкторія $T(V^*, q^*)$ у подальшому використовується як програмна і реалізується засобами системи керування.

Для визначення оптимальної траєкторії $T(V^*, q^*)$ скористаємося градієнтним методом. Знайдемо градієнт функції (2) по параметрам руху V, q :

$$\mathbf{grad} f(V, q) = \left(\frac{\partial f(V, q)}{\partial V}, \frac{\partial f(V, q)}{\partial q} \right). \quad (4)$$

$$\mathbf{grad} f(V, q) = (2a_1V + a_2, 2b_1q + b_2)$$

Градієнт (4) використовуємо для знаходження параметрів руху на наступному кроці обчислення n :

$$\mathbf{T}(n+1) = \mathbf{T}(n) - \mathbf{grad} f(V(n), q(n))h, \quad (5)$$

де h – крок ітерації.

Рівняння (4) і рекурентне співвідношення (5) дозволяють отримати оптимальну траєкторію мінімізації ризику слемінгу у часі.

Модельовання роботи алгоритму проведено на вибірках масиву даних рис. 2. Попередньо, масив даних занесено у таблицю 1.

Таблиця 1

| Частота виникнення слемінгу | | | | | |
|-----------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| V, вузли | q, гр | f(V,K) | V, вузли | q, гр | f(V,K) |
| 6 | 0 | 3 | 7 | 0 | 13 |
| | 15 | 3 | | 15 | 9 |
| | 30 | 0 | | 30 | 6 |
| | 45 | 0 | | 45 | 0 |
| 8 | 0 | 20 | 9 | 0 | 22 |
| | 15 | 18 | | 15 | 19 |
| | 30 | 12 | | 30 | 13 |
| | 45 | 3 | | 45 | 6 |
| 10 | 0 | 22 | 11 | 0 | 27 |
| | 15 | 19 | | 15 | 23 |
| | 30 | 15 | | 30 | 18 |
| | 45 | 7 | | 45 | 9 |

Для спрощення розрахунків, із повного масиву даних табл. 1 взяті лише 4 вузлові точки, виділені у таблиці жирним шрифтом. Автори не ставлять за мету максимально точно апроксимувати поверхню $f(V, q)$, що може бути зроблено із використанням більш складної апроксимуючої функції (2) або нейронної мережі, а хочуть лише показати можливість застосування даного підходу для формування оптимальної траєкторії.

Запишемо систему алгебраїчних рівнянь, використовуючи апроксимуючу функцію (2) і вузлові точки:

$$\begin{cases} a_1 6^2 + a_2 6 + b_1 0 + b_2 0 = 3 \\ a_1 8^2 + a_2 8 + b_1 (45)^2 + b_2 45 = 3 \\ a_1 11^2 + a_2 11 + b_1 (0)^2 + b_2 (0) = 27 \\ a_1 11^2 + a_2 11 + b_1 (30)^2 + b_2 30 = 18 \end{cases} \quad (6)$$

Із першого та третього рівняння системи (6) знаходимо коефіцієнти a_1 та a_2 :

$$\begin{cases} a_1 36 + a_2 6 = 3 \\ a_1 121 + a_2 11 = 27 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 6a_1 + a_2 = \frac{1}{2} \\ 11a_1 + a_2 = \frac{27}{11} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} a_1 \approx 0,391 \\ a_2 = -1,851 \end{cases} \quad (7)$$

Із другого та четвертого рівняння системи (6) знаходимо коефіцієнти b_1 та b_2 :

$$\begin{cases} a_1 8^2 + a_2 8 + b_1 (45)^2 + b_2 45 = 3 \\ a_1 11^2 + a_2 11 + b_1 (30)^2 + b_2 30 = 18 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} b_1 (45)^2 + b_2 45 \approx -7,216 \\ b_1 (30)^2 + b_2 30 = -8,95 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} b_1 \approx 0,00925 \\ b_2 \approx -0,5776 \end{cases} \quad (8)$$

Із врахуванням знайдених коефіцієнтів, апроксимуюча поверхня (2) може бути записана у вигляді

$$f(V, q) = 0,391V^2 - 1,851V + 0,00925q^2 - 0,5776q \quad (9)$$

Враховуючи (4), градієнт функції $f(V, q)$ прийме вигляд

$$\mathbf{grad} f(V, q) = (0,782V - 1,851; 0,0185q - 0,5776) \quad (10)$$

На рис. 3 показана оптимальна траєкторія виводу фазової точки із області слемінгу для початкових умов $V(0) = 11$ вуз, $q(0) = 0$ град, отримана моделюванням у середовищі MATLAB.

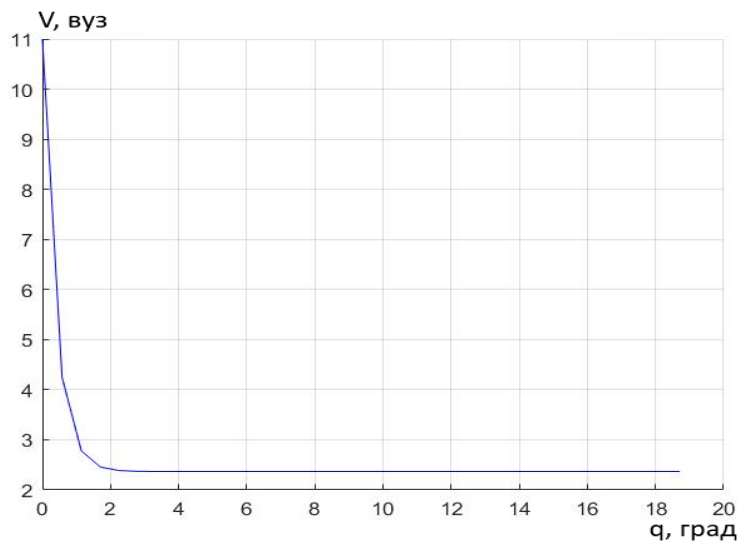


Рис. 3 – Оптимальна траєкторія виводу фазової точки із області слемінгу

Наведені результати підтверджують, що оптимальне виведення фазової точки пов'язане в першу чергу із зменшенням швидкості судна і лише потім із зміною курсового кута хвилі.

Висновки

Розроблено метод керування судном у шторм, який автоматизує процеси уникнення слемінгу, дозволяє зменшити ризики втрати судна і вантажу, зменшити вплив людського чинника на процеси керування судном, зменшити виснаженість екіпажу та в цілому підвищити безпеку судноплавства. Отриманий результат пояснюється використанням бортового обчислювача, побудовою у бортовому обчислювачі небезпечної області слемінгу, знаходженням оптимальної у часі траєкторії виводу фазової точки із небезпечної області із використанням градієнтних процедур, підтриманням засобами автоматичної системи керування оптимальної траєкторії. Розроблений метод може застосовуватися у бортовому обчислювачі автоматизованої системи або у бортовому обчислювачі автоматичного модуля керування рухом судна.

Перелік використаних джерел:

1. Kapsenberg G.K. Slamming of ships: where are we now? *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2011. Vol. 369. Iss. 1947. Pp. 2892-2919. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0118>.
2. Pferdekämper K.-H., Bekker A. Investigation of vessel slamming and fatigue using a full-scale test sequence. *Applied Ocean Research*. 2024. Vol. 144. Pp. 103883. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103883>.
3. Pferdekämper K., Bekker A. Full-scale fatigue damage investigation of a slamming-prone vessel with unique section modulus characteristics. *Developments in the Analysis and Design of Marine Structures: Proceedings of the 8th Int. Conf. on Marine Structures, Trondheim, Norway, 7-9 June*

2021. London : CRC Press, 2021. Pp. 1-8.
4. Bekker A., van Zijl C., Saunders C. The detection of wave slamming from vibration measurements on a polar supply and research vessel. *MATEC Web Conf.: The 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV)*. 2018. Vol. 211. Pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821111002>.
 5. Bereznitsky A. Local hydroelastic response of ship structures under impact loads from water (slamming): PhD Thesis. Delft, 2003. 150 p.
 6. Okada T. Marine Weather. Ship handling in rough sea. Head and countering / following seas. *P&I Loss prevention bulletin*. 2019. Vol. 45. 110 p.
 7. Resolution MSC.75(69). Adoption of amendments to the code on intact stability for all types of ships covered by imo instruments (resolution A.749(18)). [Adopted on 14 May 1998]. 1998. 19 p.
 8. Шторм. Управление судном в штормовых условиях: samvguvt. URL: <https://samvguvt.livejournal.com/48993.html> (дата звернення: 15.07.2023).
 9. Omer H., Bekker A. Human responses to wave slamming vibration on a polar supply and research vessel. *Applied Ergonomics*. 2017. Vol. 67. Pp. 71-82. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.09.008>.
 10. Tavakoli S., Hirdaris S. Hydroelastic slamming in oblique seas. *ASME 2023: 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Melbourne, Australia, 11-16 June 2023. Pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2023-104304>.
 11. Zhang M., Tavakoli S., Hirdaris S. A deep learning method for the prediction of focused waves in a wave flume. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: 12th International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023)*, Espoo, Finland, 28 August – 01 September 2023. Vol. 1288. Pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1288/1/012007>.
 12. Investigation of fluid added mass matrix during hydroelastic slamming of wedges / S. Feng, G. Zhang, C. Jiang, S. Jiang, O. el Moctar, Y. Ma. *Physics of Fluids*. 2024. Vol. 36. Iss. 1. Pp. 012133. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0180865>.
 13. On the treatment of hydroelastic slamming by coupling boundary element method and modal superposition method / S. Feng, G. Zhang, D. Wan, S. Jiang, Z. Sun, Z. Zong. *Applied Ocean Research*. 2021. Vol. 112. Pp. 102595. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102595>.
 14. Geometric Effect of Bulbous Bows to the Hydrodynamic and the Probability of Slamming on Catamaran / Sulistyawati W., Sudjasta B., Suranto P., Saputra E. *CFD Letters*. 2023. Vol. 15. № 9. Pp. 166-174. DOI: <https://doi.org/10.37934/cfdl.15.9.166174>.
 15. Økland O., Lian G., Vestbøstad T. Validation of Measurement Techniques Used for Slamming. *ASME 2022: 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, Hamburg, Germany, 5-10 June 2022. Pp. 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1115/OMAE2022-79068>.

References:

1. G.K. Kapsenberg, «Slamming of ships: where are we now?», *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 369, iss. 1947, pp. 2892-2919, 2011. doi: **10.1098/rsta.2011.0118**.
2. K.-H. Pferdekämper, and A. Bekker, «Investigation of vessel slamming and fatigue using a full-scale test sequence», *Applied Ocean Research*, vol. 144, pp. 103883, 2024. doi: **10.1016/j.apor.2024.103883**.
3. K. Pferdekämper, and A. Bekker, «Full-scale fatigue damage investigation of a slamming-prone vessel with unique section modulus characteristics», in *Proceedings of the 8th Int. Conf. on Marine Structures «Developments in the Analysis and Design of Marine Structures»*, Trondheim, Norway, 2021, pp. 1-8.
4. A. Bekker, C. van Zijl, and C. Saunders. «The detection of wave slamming from vibration measurements on a polar supply and research vessel», in *Proceedings of the 14th International Conference on Vibration Engineering and Technology of Machinery (VETOMAC XIV) MATEC Web Conf.*, 2018, vol. 211, pp. 1-6. DOI: **10.1051/mateconf/201821111002**.
5. A. Bereznitsky, «Local hydroelastic response of ship structures under impact loads from water (slamming)», PhD Thesis, Faculty Mechanical Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.

6. T. Okada, «Marine Weather. Ship handling in rough sea. Head and counterering / following seas», *P&I Loss prevention bulletin*, vol. 45, 110 p., 2019.
7. Adoption of amendments to the code on intact stability for all types of ships covered by imo instruments (resolution A.749(18)), Resolution MSC.75(69). 1998.
8. Shtorm. Upravlenye sudnom v shtormovikh uslovyiakh: samvguvt [Storm. Navigating a vessel in stormy conditions: samvguvt], 2020 [Online]. Available: <https://samvguvt.livejournal.com/48993.html>. Accessed on: July 15, 2023. (Rus.)
9. H. Omer, and A. Bekker, «Human responses to wave slamming vibration on a polar supply and research vessel», *Applied Ergonomics*, vol. 67, pp. 71-82, 2017. doi: **10.1016/j.apergo.2017.09.008**.
10. S. Tavakoli, and S. Hirdaris, «Hydroelastic slamming in oblique seas», in Proceedings of the 42nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering ASME 2023, Melbourne, Australia, 2023, pp. 1-8. doi: **10.1115/omae2023-104304**.
11. M. Zhang, S. Tavakoli, and S. Hirdaris, «A deep learning method for the prediction of focused waves in a wave flume», in Proceedings of the 12th International workshop on ship and marine hydrodynamics (IWSH-2023) «IOP Conference Series: Materials Science and Engineering», Espoo, Finland, 2023, vol. 1288, pp. 1-11. doi: **10.1088/1757-899X/1288/1/012007**.
12. S. Feng, G. Zhang, C. Jiang, S. Jiang, O. el Moctar, and Y. Ma, «Investigation of fluid added mass matrix during hydroelastic slamming of wedges», *Physics of Fluids*, vol. 36, iss. 1, pp. 012133, 2024. doi: **10.1063/5.0180865**.
13. S. Feng, G. Zhang, D. Wan, S. Jiang, Z. Sun, and Z. Zong, «On the treatment of hydroelastic slamming by coupling boundary element method and modal superposition method», *Applied Ocean Research*, vol. 112, pp. 102595, 2021. doi: **10.1016/j.apor.2021.102595**.
14. W. Sulistyawati, B. Sudjasta, P. Suranto, and E. Saputra, «Geometric Effect of Bulbous Bows to the Hydrodynamic and the Probability of Slamming on Catamaran», *CFD Letters*, vol. 15, № 9, pp. 166-174, 2023. doi: **10.37934/cfdl.15.9.166174**.
15. O. Økland, G. Lian, and T. Vestbøstad, «Validation of Measurement Techniques Used for Slamming», in Proceedings of the 41st International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering ASME 2022, Hamburg, Germany, 2022, pp. 1-9. doi: **10.1115/OMAE2022-79068**.

Рецензент: С.М. Зінченко
д-р техн. наук, проф., ХДМА

Стаття надійшла 18.09.2023
Стаття прийнята 10.10.2023

УДК 004.896.2:629.8.033.1

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300065

© Черниш Г.О.¹, Савенко О.С.²

СИСТЕМА СТАБІЛІЗАЦІЇ КУТА НАХИЛУ САМОБАЛАНСУЮЧОГО РОБОТА

Стаття присвячена розгляду системи стабілізації кута нахилу самобалансуючого робота. Об'єктом дослідження є самобалансуючі роботи, а предметом – системи стабілізації їхнього кута нахилу. Розглянуті принципи роботи та розвиток алгоритмів, які дозволяють роботу автоматично підтримувати стабільність при зміні кута нахилу. У статті проаналізовані різні рішення, що використовуються для

¹ магістрант, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, gleb.chernysh.01@gmail.com

² канд. техн. наук, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: 0000-0002-8108-2575, savenko.olja@gmail.com