

Є. В. Калініченко, Є. Є. Постніков

Одеський національний морський університет, Одеса, Україна

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ СТРУКТУРНОЇ СТІЙКОСТІ СИСТЕМИ «БУКСИРУВАЛЬНИК – СЕЙСМІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ» ПРИ МАНЕВРУВАННІ

Анотація. Актуальність. Буксирування будь-якого об'єкта в морі є окремим випадком судноводіння та потребує максимального рівня безпеки. Для вирішення цього актуального завдання необхідно вдосконалення відомих та розробки нових методів проведення морських буксирвальних операцій, які пов'язані з масовою доставкою до місця розвідувальних робіт постачання та обладнання на спеціалізованих плавучих спорудах, що мають ознаки «маломорехідних» об'єктів. **Мета статті:** удосконалити метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні. **Результати дослідження.** В статті розроблено метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу. Особливість методу полягає в тому, що ймовірність стійкості структури в межах розширених припущень визначена за допомогою теореми Боголюбова та індикаторної функції, що дозволяє визначити потенційні небезпеки, ризики та розміри ймовірної шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання, а також визначити події, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові навігаційної безпеки.

Ключові слова: буксирвальна операція, морський транспорт, навігація, ризик, сейсмічне обладнання.

Вступ

В умовах розв'язаної повномасштабної війни Російської Федерації проти України виникає актуальне державне завдання забезпечення мореплавства у Чорному морі.

Крім того, втрата Криму й відповідного шельфу призводить до необхідності сейсмічної розвідки та пошуку корисних копалин для забезпечення енергетичної безпеки України.

Після перемоги над країною-агресором виникне актуальне завдання оцінювання вичерпності ресурсів шельфу Чорного моря та пошуку нових родовищ.

Сейсмічна розвідка моря проводиться відповідним обладнанням, яке, як, правило буксирується. Особливостями сейсмічної розвідки у районі Чорного моря є порівняно невелика глибина (у середньому близько 1240 м), що потребує оцінки ризиків маневрування при буксуванні сейсмічного обладнання [1].

Постановка проблеми. Буксирування будь-якого об'єкта в морі є окремим випадком судноводіння та потребує максимального рівня безпеки [2].

Для вирішення цього актуального завдання необхідно вдосконалення відомих та розробки нових методів проведення морських буксирвальних операцій, які пов'язані з масовою доставкою до місця розвідувальних робіт постачання та обладнання на спеціалізованих плавучих спорудах, що мають ознаки «маломорехідних» об'єктів.

Аналіз існуючих літературних джерел. Завдання оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при виконанні буксирвальних операцій знайшло рішення у роботах як вітчизняних, так і закордонних дослідників й має декілька напрямків наукового дослідження.

Дослідниками, на роботи яких спирається автор, є такі:

- Вагущенко Л. Л. [6],
- Мальцев А. С. [7],
- Нечаєв Ю. І. [8],
- Піпченко О. Д. [9, 10],
- Asuelimen G., Blanco-Davis E., Wang J [11],
- Fossen T. I. [12].

Мета статті: удосконалити метод оцінювання структурної стійкості системи «буксирвальник – сейсмічне обладнання» при маневруванні.

Виклад основного матеріалу

Під час проведення сейсмічної розвідки має проводитись постійний контроль сейсмічного обладнання та його поведінки в морі.

Контроль, зазвичай, здійснюється технічними засобами об'єктивного контролю та візуально, особливо під час хитаєві.

Перевірка стану буксирувальної лінії та положення сейсмічного обладнання проводиться систематично на розсуд судноводія. Також при підготовці до виходу в море проводиться:

- технічне обслуговування буксирувального троса,
- змащувальні процедури в місцях кріплення, роллів і ключів,
- здійснюється перевірка справності сейсмічного обладнання.

Перед початком буксирування сейсмічного обладнання дані його технічного стану відображаються у журналі буксирування.

Під час сейсмічної розвідки у темний час доби або в умовах обмеженої видимості склад суден повинен вживати дії для попередження надмірного зближення з іншими суднами.

При погіршенні погодних умов під час сейсмічної розвідки судноводій буксирувальника має

виконати низку дій для забезпечення безпеки складу суден:

- зниження швидкості буксирування;
- зменшення/збільшення довжини буксирувального тросу;
- вибір безпечного для складу суден курсових кутів за вітром та рівнем хитавиці;
- посилення спостереження за станом сейсмічного обладнання;
- згортання сейсмічного обладнання.

По закінченню сейсмічної розвідки керівник оформлює відповідні документи, в яких фіксується час початку та завершення буксирування, маршрут, події, що виникли під час розвідки.

Дані сейсмічної розвідки оброблюються та узагальнюються.

Варіантом вирішення проблемних (аварійних) ситуацій у відносно стабільних структурах управління, до яких належить операція буксирування сейсмічного обладнання, є метод усереднення. Він використовується при дослідженні процесу функціонування структури організаційно-технічної системи, відповідальної за буксирування сейсмічного обладнання.

Проте, складності використання методу виникають при практичній реалізації у випадку, коли наближення справедливо не для часового відрізка $[0; \frac{1}{\varepsilon}]$, де $\varepsilon > 0$ – малий параметр, а для значно меншого часового інтервалу. При цьому не виконуються умови, які дозволяють виконати тільки перше наближення.

Одержимо наближення для часового проміжку $[0; \frac{1}{\varepsilon}]$ методом стандартного усереднення.

Стан системи управління безпекою судна, як система диференціальних рівнянь першого порядку, записаний у стандартному вигляді:

$$dx/dt = \varepsilon X(x, t, \varepsilon), \quad \text{де } x \in R^r, \varepsilon \in (0, \varepsilon], \quad t \in [0, \infty). \quad (1)$$

Нехай функція $X(x, t, \varepsilon)$ рівномірно обмежена при $x = 0$. Тоді виконується умова Липшица за аргументом x :

$$|X(x_1, t, \varepsilon) - X(x_2, t, \varepsilon)| \leq M_{|x_1 - x_2|},$$

де $M = const, x_1, x_2 \in R^r$.

У такому випадку кожна із задач Коші

$$x(0) = x_0$$

для рівняння (1) буде мати тільки одне нелокально-продовжене рішення у формі $x(t, x_0, \varepsilon)$.

Рішенням правої частини усередненого рівняння (1) буде формула:

$$Z(x, \varepsilon) = (1/T) \varepsilon \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T X(x, t, 0) dt, \quad (2)$$

при функції $X(x, t, \varepsilon)$, що допускає усереднення як обов'язкову умову, і коли, функція $\sigma(\varepsilon)$ така, що $\sigma(\varepsilon) \rightarrow 0$ при $(\varepsilon) \rightarrow 0$ для будь-якої обмеженої області $\Omega \subset R^r$, буде виконуватися умова:

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow \infty} \left| \varphi(x) - (\varepsilon/\sigma(\varepsilon)) \int_0^{\frac{\sigma(\varepsilon)}{\varepsilon}} X(x, t + s, \varepsilon) ds \right| = 0, \quad (3)$$

$$x \in \Omega \quad 0 \leq t \leq \varepsilon 1/\varepsilon.$$

У випадку виконання сформульованої умови межа виразу (2) може виявитися неіснуючою або бути відмінною від функції $\varphi(x)$.

При використанні звичайного методу усереднення достатньо виконання умови для кожної з обмежених областей

$$\limsup_{\varepsilon \rightarrow \infty} |X(x, t, \varepsilon) - X(x, t, 0)| = 0, \quad x \in \Omega \quad 0 \leq t \leq \varepsilon 1/\varepsilon. \quad (4)$$

Допущення (4) свідчить про необхідність застосування звичайного методу усереднення.

Якщо для будь-якої обмеженої області $\Omega \subset R^r$ виконується умова (4), тоді межа (3) існує тільки у випадку, якщо функція $X(x, t, \varepsilon)$ допускає усереднення. Тоді

$$\lim_{T \rightarrow \infty} (1/T) \int_0^T X(x, t, 0) dt = \varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x, t, \varepsilon) dt$$

і умова (3) виконується для будь-якої обмеженої області

$$\Omega \subset R^r$$

і будь-якої функції

$$\sigma(\varepsilon) = \varepsilon^\alpha,$$

де $\alpha < 1$.

Розширити можливості методу усереднення можливо, якщо припустити, що функція

$$X(x, t, \varepsilon)$$

допускає усереднення й існує межа:

$$\varphi(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon \int_0^{1/\varepsilon} X(x, t, \varepsilon) dt,$$

а функція $\varphi(x)$ з постійної M буде задовольняти умові Липшица.

Тоді задача Коші:

$$dx'/dt = \varepsilon \varphi(x'), \quad x'(0) = x_0 \quad (5)$$

має тільки одне рішення:

$$x'(t, x_0, \varepsilon).$$

Для будь-якої обмеженої області

$$\Omega \subset R^r$$

та для будь-якого $\sigma > 0$ можна знайти таке число $\varepsilon_1 > 0$, при якому зі співвідношень

$$0 < \varepsilon \leq \varepsilon_1 \text{ і } x_0 \in Q,$$

враховуючи умову (3), одержимо нерівність

$$\max |x'(t, x_0, \varepsilon) - x(t, x_0, \varepsilon)| < \sigma;$$

$$0 \leq t \leq 1/\varepsilon.$$

Нерівність підтверджує факт, що за умови (3) функція $X(x, t, \varepsilon)$ приймає усереднене значення за проміжок часу приблизно $\sigma(\varepsilon)/\varepsilon$.

У цей же період часу $x(t, x_0, \varepsilon)$ зміниться на значення порядку $\sigma(\varepsilon)$.

Отже, траєкторія $x(t, x_0, \varepsilon)$ у системі (1) виявиться подібною до траєкторії $x'(t, x_0, \varepsilon)$ усередненої системи (5).

На цій підставі слід вважати, що представлений спосіб методу усереднення буде застосований для більш широких допущень, і дозволить визначити відповідне приближення, поряд зі звичайним методом усереднення.

Процес управління ризиком у структурах, що забезпечують безпеку буксирування сейсмічного обладнання, має всебічно розглядати різні аспекти операції буксирування, пов'язані з ризиком, що передбачає:

- визначення й аналіз ризику,
- оцінку помірному ризику із розрахунком можливості його зниження, застосовуючи контроль керуючих дій.

Визначення потенційних небезпек, їх аналіз та визначення відповідних ризиків є структурованим процесом, завдання якого полягає у визначенні ступеню ймовірності виникнення події та розміру ймовірних збитків та втрат від змін структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання.

Наслідками несприятливих подій слід вважати міру завдання шкоди людині, буксирувальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу. При здійсненні аналізу можливого ризику необхідно провести аналіз його похідних та наслідків:

- ідентифікація небезпеки, що полягає у визначенні причини реструктуризації системи;
- ймовірність виникнення небезпечної ситуації та частота її виникнення;
- втрати та збитки тієї чи іншої небезпечної ситуації, оцінка наслідків.

Для визначення ймовірності події застосовується індикаторна функція:

$$f(x) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma, \\ 0, \text{ якщо } x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma. \end{cases} \quad (6)$$

Тоді вираз

$$\left[\int_0^t f(x) dt \right] / m$$

визначає частку в результаті розподілу кількості станів

$$x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma \text{ (одиниць)}$$

на загальну кількість m станів спостережень організаційно-технічної структури безпеки (одиниць і нулів).

У такому випадку рівність дає можливість визначити ймовірність (середню частоту) структурної стійкості організаційно-технічної структури, відповідальної за безпечне буксирування сейсмічного обладнання:

$$f^*(x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left[\int_0^t f(x) dt \right] / m.$$

Нехай для будь-якої множини X функція $f^*(x)$ дорівнює постійній величині. Тоді, з урахуванням співвідношення:

$$\int_X f^*(x) dm = \int_X f(x) dm$$

одержимо таку рівність:

$$1/m \sum_{k=1}^m f(x) = m(x)/m(X) = \text{const} = p.$$

Основні результати

Отже, ймовірність стійкості організаційно-технічної структури, що забезпечує безпечне буксирування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу визначена за допомогою значення p в межах теореми Боголюбова.

У такому випадку часовій послідовності змін (1) структури організаційно-технічної системи буксирування сейсмічного обладнання притаманна властивість ергодичності.

Аналогічно до гіпотези повної ймовірності складної події виду (6), отримаємо значення ймовірності p_0 подій

$$x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma,$$

при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові безпечної експлуатації, а, отже, і навігаційної безпеки.

Запропонований метод усереднення дозволяє знаходити необхідне відповідне наближення для оцінки ймовірності стійкості структури організаційно-технічної системи управління навігаційним станом складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання в межах розширених припущень.

Для підтримання стану структурної стійкості достатнім є привести до мінімуму величину p_0 , оскільки область реалізації послідовності структурних переходів містить дві точки щільності.

Ресурс буксирувальника та сейсмічного обладнання дозволяє забезпечити підтримку стійкості структури в системі управління станом навігації складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання.

Висновки

Таким чином, удосконалено метод оцінювання структурної стійкості системи “буксирвальник – сейсмічне обладнання” при маневруванні, що забезпечує безпечне буксування сейсмічного обладнання в будь-який момент часу, в якому на відміну від відомих, ймовірність стійкості структури в межах розширених припущень визначена за допомогою теореми Боголюбова та індикаторної функції,

що дозволяє визначити потенційні небезпеки, ризики та розміри ймовірної шкоди людині, буксирвальнику, сейсмічному обладнанню або навколишньому середовищу від змін структури організаційно-технічної системи буксування сейсмічного обладнання, а також визначити події, при яких порушується структурна стійкість та експлуатаційний стан складу суден буксирвальника та сейсмічного обладнання, які не відповідають умові навігаційної безпеки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технологія видобування нафти / В. М. Орловський, В. С. Білецький, В. Г. Вітрик, В. І. Сіренко. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП, «Бурова техніка», Львів, «Новий Світ – 2000», 2022. 308 с., available at: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/fa0fd3ad-889a-46da-8e88-92f0ba6cd049/content>
2. Polydorides N., Storteig E., Lionheart W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35, No 14–15. P. 1429–1438, DOI: [10.1016/j.oceaneng.2008.07.001](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.07.001), available at: https://www.researchgate.net/publication/222516613_Forward_and_inverse_problems_in_towed_cable_hydrodynamics
3. Ткаченко І. О. Ризики у транспортних процесах : навч. посібник / І. О. Ткаченко. –Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 114 с.
4. Голиков В. А., Мальцев А. С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА. 2007. Вып. 13. С. 58– 74, available at: http://old.onma.edu.ua/index.php?nauka-sv_ua
5. Priyadarshini D., Muhammad J., Mauerman L. Utilizing Skills to Improve Behavior Based Safety. *PSJ*, 2020. P. 48–52, available at: https://www.researchgate.net/publication/344619575_Utilizing_Skills_to_Improve_Behavior_Based_Safety
6. Вагущенко Л. Л., Вагущенко А. Л. Поддержка решений по расхождению с судами. Одесса : Феникс, 2010. 229 с., available at: http://www.eurostarLtd.net/prog/vagushchenko_rashozhdenie_sudami.htm
7. Мальцев А. С. Интеллектуальные гибридные системы поддержки принятия решений при расхождении судов. Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА, 2006. Вып. 11. С. 74–86.
8. Нечаев Ю. И., Сизов В. Г. Принятие решений в условиях неопределенности в задачах безопасности мореплавания. Судовождение : сб. научн. трудов ОНМА, 2006. Вып. 11. С. 91–107.
9. Піпченко О. Д. Розвиток теорії та практики управління ризиками при вирішенні комплексних навігаційних задач : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.13. Одеса, 2021.
10. Піпченко А. Д. Определение дистанции опасного сближения при расхождении маневром собственного судна. Вестник Одесского национального морского университета, 2017. Вып. 2(51). С. 156–164, available at: <http://visnyk.onmu.odessa.ua/index.php/1/issue/view/53>
11. An M., Wang J., Ruxton T. The development of fuzzy linguistic risk level for analysis of offshore engineering products using approximate reasoning approach. *Proceedings of OMAE 2000, the 19th International Conference of offshore mechanics and Arctic Engineering*. New Orleans, USA, 2000. P. 321–329.
12. Fossen T. I. A Nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway. *Norwegian University of Science and Technology*, 2005. 28 p.

Received (Надійшла) 11.09.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.11.2023

Method of evaluating the structural stability of the system "tug - seismic equipment" during manoeuvring

Y. Kalinichenko, Y. Postnikov

Abstract. Topicality. Towing any object at sea is a special case of shipping and requires the highest level of safety. To solve this urgent task, it is necessary to improve the known and develop new methods of conducting sea towing operations, which are associated with the mass delivery of supplies and equipment to the place of reconnaissance work on specialized floating structures that have the characteristics of "low-speed" objects. **The purpose of the article:** to improve the method of assessing the structural stability of the "tug-seismic equipment" system during maneuvering. **Research results.** The article develops a method for assessing the structural stability of the "towboat - seismic equipment" system during maneuvering, which ensures safe towing of seismic equipment at any time. The peculiarity of the method is that the probability of stability of the structure within the extended assumptions is determined using Bogolyubov's theorem and the indicator function, which allows to determine potential dangers, risks and the extent of probable damage to a person, a tugboat, seismic equipment or the environment from changes in the structure of the organizational and technical system towing of seismic equipment, as well as to determine events that violate the structural stability and operational condition of the towing vessel and seismic equipment, which do not meet the condition of navigational safety.

Keywords: towing operation, marine transport, navigation, risk, seismic equipment.