

УДК 656.612.8

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300120

© Калініченко Є.В.¹, Постніков Є.Є.²**МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЇ СЕЙСМІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ СТАЦІОНАРНОМУ ХАРАКТЕРІ МОРСЬКОГО БУКСИРУВАННЯ**

За останні 50 років все більшої актуальності набуває пошук запасів природного газу для забезпечення потреб підприємств і господарств. Основним методом пошуку родовищ корисних копалин є сейсмозв'язка. У зв'язку зі скороченням ресурсів на суші сейсмозв'язка в морі є перспективною, про що свідчать високі темпи розвитку морської сейсмічної техніки. А сучасні технології в області сейсмозв'язки забезпечили популярність методів пошуку корисних копалин як на морі, так і в світі в цілому. Оскільки визначення траєкторії руху сейсмічного обладнання під час швидкого маневру відносно основного курсу є складною багатовимірною задачею, доцільно використовувати аналітичний метод. Аналітичний метод дозволить досліджувати динаміку сейсмічного обладнання з урахуванням ряду припущень та обмежень. Для проведення сейсмозв'язки на морі використовується комплекс спеціального обладнання, що включає бортову та позаборткову складові. Сейсмічне обладнання слід розглядати як маломорехідний об'єкт. При швидкому маневрі сейсмічне обладнання зміщується на певний кут миттєво відносно буксирувальника, як наслідок, рух сейсмічного обладнання слід вважати нелінійним. Як правило, сейсмічна апаратура розміщується на судах з широкою кормою, на якій закріплюється підвісна апаратура. Дослідження у статті ґрунтуються на використанні відомих методів наукового пошуку: системного аналізу, теорії управління ризиками, методів математичного моделювання для визначення показників маневрування та руху буксирувальника й сейсмічного обладнання. У статті удосконалено методу визначення траєкторії руху сейсмічної апаратури в стаціонарному режимі морського буксирування. Особливістю методу є заміна руху буксирного судна і сейсмічного обладнання їх характерними точками, що дозволяє при швидких і помірних змінах курсу буксира розглядати траєкторію руху сейсмічного обладнання як положу криву, визначати під час буксирування різні кінематичні характеристики мілководного об'єкта та враховувати їх при розробці проекту буксирування для різноманітних умов навколишнього середовища з дотриманням норм безпеки судноплавства.

Ключові слова: буксирування, динаміка, морська платформа, безпека плавання, хвилювання.

Y.V. Kalinichenko, Y.Y. Postnikov. Method of determining the trajectory of seismic equipment in the stationary character of sea towing. Over the past 50 years, the search for natural gas reserves to meet the needs of enterprises and farms has become more and more relevant. The main method of finding mineral deposits is seismic exploration. In connection with the reduction of resources on land, seismic exploration in the sea is promising, as evidenced by the high rate of development of marine seismic technology. And modern technologies in the field of seismic exploration have ensured the popularity of methods of searching for minerals both at sea and in the world as a whole. Since determining the trajectory of the movement of seismic equipment during a fast maneuver relative to the main course is a complex multidimensional task, it is advisable to use an analytical method. The analytical method will allow to study the dynamics of seismic equipment taking into account a number of assumptions and limitations. A complex of special equipment is used for conducting seismic exploration at sea, which includes on-board and off-board

¹ канд. техн. наук, доцент, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0003-2898-7313, kalinichenko.yevgeniy1964@gmail.com

² аспірант, Одеський національний морський університет, м. Одеса, ORCID: 0000-0001-7327-5353, postnikov.zhenya@ukr.net

components. Seismic equipment should be considered as a low-sea facility. During a quick maneuver, the seismic equipment moves to a certain angle instantaneously relative to the tug, as a result, the movement of the seismic equipment should be considered non-linear. As a rule, seismic equipment is placed on ships with a wide stern, on which the suspended equipment is fixed. The research in the article is based on the use of well-known methods of scientific research: system analysis, risk management theory, mathematical modeling methods for determining maneuvering and movement indicators of the tugboat and seismic equipment. The article improves the method of determining the trajectory of seismic equipment in the stationary mode of sea towing. The peculiarity of the method is the replacement of the movement of the towing vessel and the seismic equipment with their characteristic points, which makes it possible to consider the trajectory of the movement of the seismic equipment as a gentle curve with rapid and moderate changes in the course of the tug, to determine during towing various kinematic characteristics of the shallow-water object and to take them into account when developing the towing project for a variety of environmental conditions in compliance with shipping safety standards.

Key words: *towing, dynamics, marine platform, navigation safety, excitement.*

Постановка проблеми. За останні 50 років пошук запасів природного газу для задоволення потреб підприємств та господарств стає дедалі значущим. Основним методом пошуку родовищ корисних копалин є сейсмічна розвідка [1]. Завдяки зниженню ресурсів на суші, перспективною є сейсмічна розвідка в морі, про що свідчить високий темп розвитку морського сейсмічного обладнання. А сучасні технології в галузі сейсмічної розвідки забезпечили популярність методів пошуку корисних копалин як на морі, так і у світі загалом.

Для проведення сейсмічної розвідки в морі використовують комплекс спеціального обладнання, який містить бортову та позабортну компоненту. Як правило, сейсмічне обладнання розміщене на судах із широкою кормою, на яких закріплене забортне обладнання:

- згорнуті сейсмічні коси, що буксируються;
- джерела коливань, приймачі;
- допоміжне обладнання (компресори та ін.).

Сейсмічне обладнання слід розглядати як маломорехідний об'єкт. У морській практиці виділяють два варіанти маневру маломорехідних об'єктів – швидкий та повільний.

При швидкому маневрі сейсмічне обладнання зміщується на певний кут миттєво відносно буксирувальника, як наслідок, рух сейсмічного обладнання слід вважати нелінійним. Траєкторія руху сейсмічного обладнання після швидкого маневру від головного (запланованого) курсу залежить від:

- швидкості ведення сейсмічної розвідки;
- натягу буксирувальної лінії в точці з'єднання;
- гідрометеорологічних умов (швидкості та напрямку вітру, хвилювання моря та сили течії).

Оскільки визначення траєкторії руху сейсмічного обладнання при швидкому маневрі відносно головного курсу є складною багатомірною задачею, то доцільним є застосування аналітичного методу. Аналітичний метод дозволить дослідити динаміку сейсмічного обладнання, враховуючи низку допущень та обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження у статті ґрунтуються на використанні відомих методів наукового пошуку:

- системного аналізу – для формалізації завдання оцінювання ризиків проведення буксирувальних операцій [2-4];
- теорія управління ризиками – для безпосереднього оцінювання ризиків та розроблення методів управління ними [5-8];
- методи математичного моделювання – для визначення показників маневрування та руху буксирувальника й сейсмічного обладнання [9-11].

Метою статті є удосконалення методу визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування.

Виклад основного матеріалу. При підготовці та проведенні операції буксирування сейсмічного обладнання має забезпечуватись контроль та виконання елементів навігаційної безпеки. На початку буксирування сейсмічного обладнання реалізуються:

- поступовий набір швидкості без надмірних прискорень та ривків для уникнення пошкоджень буксирувальної лінії;
- фіксація оборотів та кута гвинтів керування після встановлення натягу буксирувальної лінії, поступове збільшення швидкості;
- встановлення оптимальної довжини буксирувального тросу після встановлення сейсмічного обладнання у встановлене положення;
- візуальний огляд буксирувальної лінії після встановлення запланованої швидкості проведення сейсмічної розвідки.

Під час буксирування сейсмічного обладнання виконується низка заходів, спрямована на підтримання та забезпечення безпеки:

- встановлення постійного чергування зі спостереження за буксирувальною лінією та сейсмічним обладнанням;
- встановлення правил дій при надзвичайних ситуаціях;
- уникнення курсових кутів відносно хвилі, що потенційно призведуть до надмірного навантаження на буксирувальну лінію;
- встановлення довжини буксирувальної лінії, яка б забезпечувала мінімальне розхитування сейсмічного обладнання та одночасне сходження та спускання буксирувальника та сейсмічного обладнання;
- встановлення оптимальної швидкості буксирувальника, яка б дозволяла вести сейсмічну розвідку та не допускати зниження швидкості, що призведе до зниження натягу буксирувальної лінії та втрати управління;
- уникнення різких змін курсу буксирувальника, у випадку надзвичайних ситуацій разом зі зміною курсу помірно зменшувати довжину буксирувальної лінії.

При аварійній зупинці складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання необхідно:

- вжити заходів щодо запобіганню шкоди сейсмічному обладнанню та буксирувальнику при раптовій зупинці;
- врахувати ризик небезпечного зближення сейсмічного обладнання та буксирувальника при зниженні натягу буксирувального тросу під дією його ваги.

У математичній постановці задачі рух складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання замінено характерними точками, які описують їх рух. Характерними точками буксирувальника є точка з'єднання із буксирувальним тросом. Характерною точкою сейсмічного обладнання є точка кріплення до буксирувальної лінії. Умовна пряма, що з'єднує характерні точки буксирувальника та сейсмічного обладнання, є базою буксирування.

Як відомо, динаміка системи складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання із врахуванням усіх впливаючих дій та прискорень є складним завданням гідродинаміки. Враховуючи схематизацію завдання, яке дозволить її спростити, виникає математична модель, що складається із системи нелінійних диференціальних рівнянь зі звичайними або частковими похідними. Як наслідок, заміщення руху складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання на їх характерні точки дає можливість уникнути розгляду низки надлишкових ускладнюючих обставин, проте принципово не вплине на результат розв'язання задачі.

Нехай одним із обмежень буде таке. Крива провисання буксирувальної лінії не враховується, а зміна курсу буксирувальника є незначною. Математичну модель за визначеним обмеженням можна записати як систему диференціальних рівнянь зі збереженням усіх членів не вище першого порядку. Враховуючи математичну модель, при зміні курсу буксирувальника траєкторію сейсмічного обладнання слід розглядати як плоску криву. У результаті дослідження динаміки складу суден буксирувальника і сейсмічного обладнання отримаємо дані щодо руху сейсмічного обладнання при швидких і помірних змінах курсу буксирувальника. Отримані дані є основою навігаційної безпеки при плануванні та виконанні завдань сейсмічної розвідки.

Нехай вага сейсмічного обладнання дорівнює m , а рух характерної точки сейсмічного обладнання B за умови довільного руху характерної точки буксирувальника A , тоді її вектор визначається як $r_A = r_A(t)$. Опис руху характерних точок буксирувальника та сейсмічного обладнання

слід представити у вигляді диференціальних рівнянь.

Проведемо запис векторної рівності у скалярній формі: $x_A = x_A(t)$, $y_A = y_A(t)$. Таким чином, слід вважати, що характерна точка сейсмічного обладнання рухається під впливом двох сил:

- сила буксирувальної лінії F , що відображає реакцію буксирувальної лінії між характерними точками A та B , та прийнята як не значна;
- векторна сила опору руху R .

Векторна сила опору руху R визначається як

$$R = \psi(v) (v^*/v),$$

де v^* – вектор швидкості характерної точки B за модулем v ;

$\psi(v)$ – функція швидкості характерної точки A .

Враховуючи векторну рівність $r_B = r_A - AB$, отримаємо залежність для координат характерних точок

$$x_B = x_A - L \cos \varphi, y_B = y_A - L \sin \varphi, \quad (1)$$

де L – буксирувальна лінія.

Диференціальні рівняння руху характерної точки сейсмічного обладнання B слід описати виразами:

$$m d^2 x_B / dt^2 = F \cos \varphi - R_x; \quad (2)$$

$$m d^2 y_B / dt^2 = F \sin \varphi - R_y, \quad (3)$$

де $m d^2 x_B / dt^2$, $m d^2 y_B / dt^2$ – похідні часу.

До рівняння (2) підставимо результуюче значення виразу (3) та отримаємо модуль вектора F . Результатом підстановки буде формула:

$$m d^2 y_B / dt^2 = (m d^2 x_B / dt^2 + R_x) (\sin \varphi / \cos \varphi) - R_y. \quad (4)$$

При наступному диференціюванні виразів (2) та (3) та підстановки отриманих значень до виразу (4) отримаємо:

$$\begin{aligned} m(d^2 y_A / dt^2 \cos \varphi - d^2 x_A / dt^2 - a d\varphi^2 / dt^2) = \\ = -(\psi(v)/v)(dy_A / dt \cos \varphi - dx_A / dt - a d\varphi / dt), \end{aligned} \quad (5)$$

де $a = \text{const}$.

У результаті розв'язання диференціального рівняння (5) відносно φ , при підстановці результату виразу (1) отримаємо закон руху характерної точки сейсмічного обладнання B залежно часу. Якщо далі традиційно припустити, що опір середовища є пропорційним квадрату швидкості буксирувальника

$$\psi(v) = \lambda v^2,$$

то при диференціюванні виразу (5) отримаємо:

$$m(d^2 y_A / dt^2 \cos \varphi - d^2 x_A / dt^2 - a d\varphi^2 / dt^2) = -\lambda v(dy_A / dt \cos \varphi - dx_A / dt - a d\varphi / dt). \quad (6)$$

Розглянемо два окремі випадки.

Перший випадок. Нехай буксирувальник рухається по запланованому маршруті без маневрування. У такому випадку траєкторія руху характерної точки A буксирувальника є прямою лінією. Якщо $x_A = vt$, то при $y_A = 0$ при диференціюванні виразу (6) отримаємо:

$$\begin{aligned} (m/\lambda L) a d\varphi^2 / dt^2 + ((v/L) \sin \varphi + d\varphi / dt) \times \left[(v^2/L^2) \cos^2 \varphi + ((v/L) \sin \varphi + \right. \\ \left. + (d\varphi / dt))^2 \right]^{1/2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Другий випадок. Нехай траєкторія руху характерної точки буксирувальника A є циркуляцією радіусів $D/2 = R_C$. У такому випадку:

$$x_A = R_C \cos(vt/R_C), y_A = R_C \sin(vt/R_C).$$

При диференціюванні виразу (6) отримаємо:

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt^2 = (mv^2/\lambda LR_c^2) \sin(vt/R_c - \varphi) + [v \cos(vt/R_c - \varphi) - Ld\varphi/dt] \times [(v/L)^2 \sin^2(vt/R_c - \varphi) + (v/L) \cos(vt/R_c - \varphi) + (d\varphi/dt)]^{1/2}. \quad (8)$$

Результати модельних випробувань наведені на рис. 1 та 2.

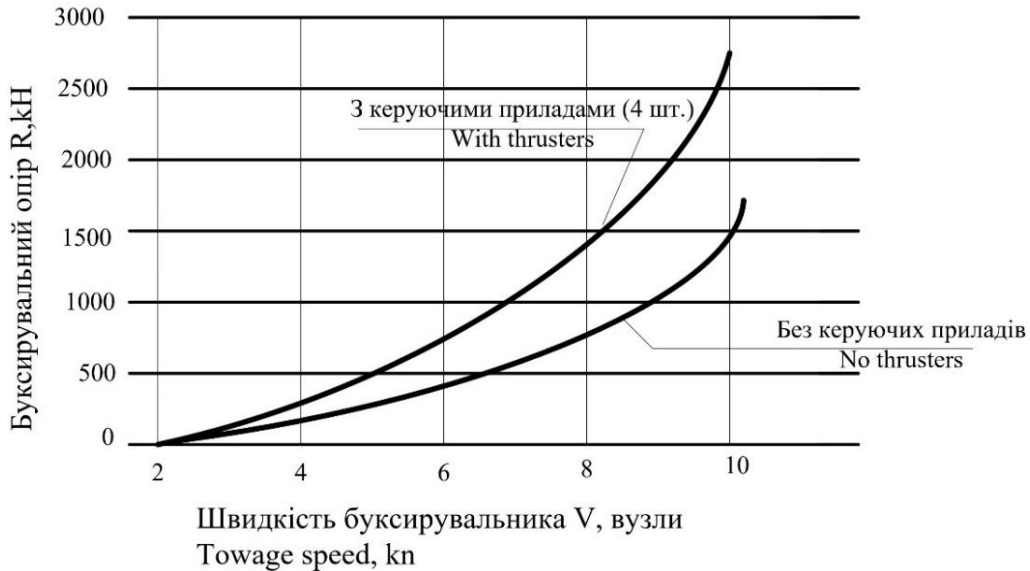


Рис. 1 – Залежність буксирувального опору маломорехідного об'єкту відносно швидкості буксування без врахування хитавиці



Рис. 2 – Залежність буксирувального опору маломорехідного об'єкту від швидкості буксування з урахуванням хитавиці

Аналіз отриманих даних свідчить, що при натягу буксирувальної лінії в розглянутому діапазоні і швидкості руху складу суден буксирувальника та маломорехідного обладнання, враховуючи гідродинамічні особливості маломорехідного об'єкта, доцільно вважати, що $\Psi(v) = \lambda v^n$, де $n \rightarrow 1$. У такому випадку отримаємо лінійну залежність опору зовнішнього

середовища відповідно швидкості буксирування $\Psi(v) = \lambda v$. Визначена залежність наведена на рис. 3.

З рис. 3 очевидно, що вектор швидкості маломорехідного об'єкта співпадає з напрямком тяги буксирувальника, як наслідок диференційні рівняння (7) та (8) доцільно замінити виразом:

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt + [(v/L) \sin \varphi + d\varphi/dt]L = 0$$

або

$$(m/\lambda L)ad\varphi^2/dt + [d\varphi/dt - (mv^2/\lambda L) \sin(\beta + \varphi - vt/R_c)/R_c \cos \beta] = 0.$$

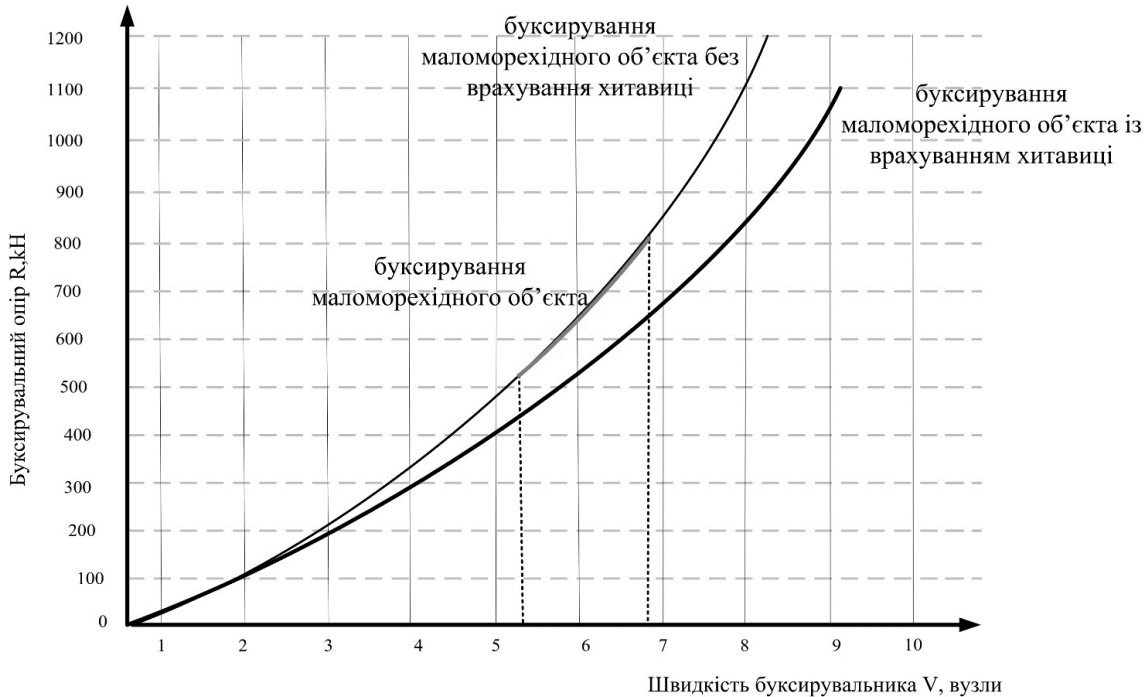


Рис. 3 – Узагальнений аналіз залежності буксирувального опору від швидкості буксирування

При буксируванні маломорехідних об'єктів величину $m/\lambda L$ слід вважати малим параметром. При допущенні, що $m/\lambda L \rightarrow 0$, отримаємо диференціальне рівняння плоскої кривої, яка описує рух маломорехідного об'єкта при компенсуванні розхитування буксирувальника, яка є трактисою прямої лінії:

$$d\varphi/dt + (v/L) \sin \varphi = 0. \tag{9}$$

Як наслідок, якщо виконується морське буксирування для подій виду $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$ або $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) \geq \sigma$, для опису траєкторії маломорехідного об'єкта слід використовувати аналітичний опис трактиси прямої лінії (рис. 4).

Розглядаючи рис. 4, справедливо відмітити, що між кутом φ та курсовим кутом існує залежність: $q_B = \pi - \varphi$. Тому, як наслідок, маємо співвідношення: $q_B/dt = -d\varphi/dt$. Рівняння (9) слід записати як:

$$dq_B/dt - (v/L) \sin q_B = 0. \tag{10}$$

У результаті інтегрування залежності (10) отримаємо:

$$L(q_B - q_{B0}) = \int_0^t v \sin q_B dt,$$

де q_B – кут між напрямком маломорехідного об'єкта у початковий момент часу та діаметральною площиною буксирувальника після повороту судна;

$q_{B0} = \pi - \Delta K$, де ΔK – величина зміни курсу буксирувальника.

Як наслідок, вираз траєкторії для сейсмичного обладнання отримаємо з формули (10):

$$dq_B / \sin q_B = (v/L) dt.$$

Провівши його інтегрування, маємо:

$$\int_{q_{B0}}^{q_B} dq_B / \sin q_B = (v/L) \int_0^t dt.$$

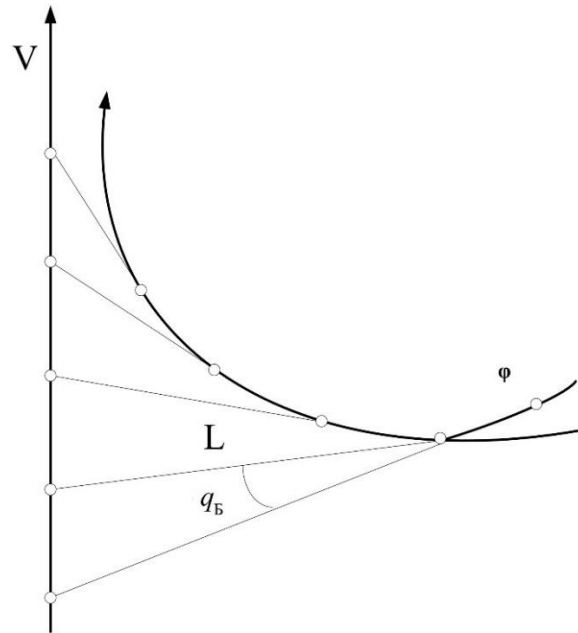


Рис. 4 – Опис траєкторії сейсмичного обладнання

Звідки

$$\ln \left[\frac{tg(q_B/2)}{tg(q_{B0}/2)} \right] = vt/L$$

або

$$tg(q_B/2) = (ctg(\Delta K/2)) \exp S/L, \tag{11}$$

де S – рух буксирувальника після маневру.

Формула (11) є рівнянням трактиси прямої лінії, а отже при повороті буксирувальника на кут q_B кут буксирувальника поступово зміщується до 180° , як наслідок, траєкторія руху маломорехідного об'єкта стає подібною до траєкторії буксирувальника. Слід вважати, що траєкторія руху маломорехідного об'єкта є асимптотою.

Як наслідок, отримаємо математичні залежності при апроксимації траєкторії руху маломорехідного об'єкта за умови: $x(t, x_0, \varepsilon) - x'(t, x_0, \varepsilon) < \sigma$, що необхідно для рішення завдань забезпечення безпеки навігації при плануванні операцій з буксирування.

Диференційне рівняння (10) можна отримати через послідовність геометричних операцій, розглянувши траєкторію руху маломорехідного об'єкта. Нехай зміна курсу буксирувальника (поворот) відбулася миттєво, а подальший рух є прямолінійним та непротяжним. За умови, що в деякий момент часу база буксирувальника L формує своєю траєкторією кут q_B , відновимо перпендикуляр до напрямку характерних точок складу суден, буксирувальника – A та маломорехідного об'єкта – B , отримаємо центр повороту на прямій (точка C). Отже величина миттєвої кутової швидкості прямої AB визначається як $dq_B/dt = v/AC$. Визначення векторно-графічним способом миттєвого центру повороту точки C наведено на рис. 5.

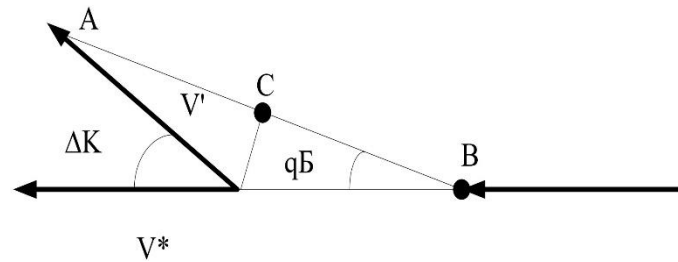


Рис. 5 – Визначення векторно-графічним способом миттєвого центру повороту точки С при маневруванні

Зважаючи, що $AC = L/\sin q_B$, отримаємо

$$dq_B/dt - (v/L) \sin q_B = 0. \tag{12}$$

Очевидно, що формули (10) та (12) тотожні.

Слід зазначити, що графічно можна відобразити траєкторію руху маломорехідного об'єкта, в тому числі при маневруванні.

Розглянемо випадок зміни курсу буксирувальника, коли кут буксирувальника змінено відносно первісного курсу на $\Delta K = \pi - q_{B0}$. Як наслідок, буксирувальник рухається за новим курсом. L – відстань по горизонталі між буксирувальником і маломорехідним об'єктом.

Для побудови траєкторії руху маломорехідного об'єкта необхідно виконати процедуру, яка складатиметься з таких послідовних етапів:

- 1) визначення та відбір на лінії нового курсу буксирувальника набору точок n , розташованих рівномірно на малій відстані одна від одної;
 - 2) з'єднання цих n точок прямою лінією;
 - 3) відкладання відрізка a , рівного довжині L ;
 - 4) з'єднання точок з прямою лінією та відкладання відрізка b , що дорівнює довжині L .
- Аналогічно для точок v, g та ін.

З'єднання точок a, b, v та інших дозволить сформувати траєкторію руху маломорехідного об'єкта – трактрису прямої лінії (рис. 6).

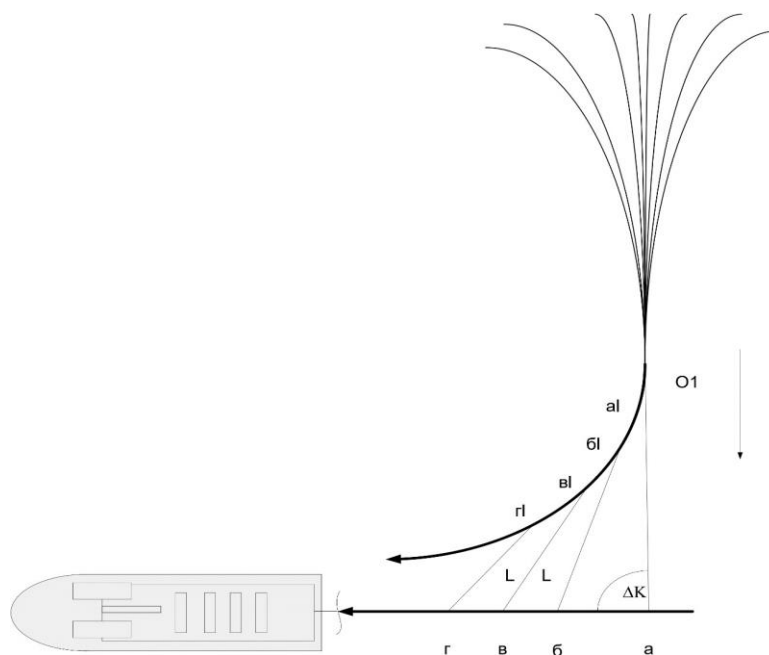


Рис. 6 – Траєкторія руху маломорехідного об'єкта при зміні курсу ΔK на 90 градусів праворуч

Але графічний метод побудови траєкторії маломорехідного об'єкта не дозволяє визначити загальні закономірності його руху залежно від головного курсу буксирувальника. А отже, виникає необхідність визначення руху буксирувальника у параметричному вигляді для визначення загальних закономірностей руху маломорехідного об'єкта.

Розглянемо рисунок в обрисі прямокутної системи координат. Траєкторія маломорехідного об'єкта є кривою другого порядку, де L – довжина дотичної та має постійне значення, а диференціальне рівняння матиме вигляд:

$$y^2 + AB^2 = L^2,$$

де $y = L \sin q_B$.

Розрахунок довжини дотичної здійснюється за виразом:

$$AB = \frac{ydy}{dx}.$$

Тоді

$$L^2 \sin^2 q_B + L^2 \sin^2 q_B (dx/dy)^2 = L^2$$

і, отже,

$$dx = ctg q_B dy.$$

Підставляючи у цей вираз значення $dy = L \cos q_B \cdot dq_B$, одержимо

$$dx = L(\cos^2 q_B / \sin q_B) dq_B,$$

а після інтегрування цього виразу остаточно знайдемо

$$x = L \ln tg(q_B/2) + L \cos q_B + C.$$

Таким чином, параметричні рівняння трактриси прямої лінії можуть бути представлені таким чином:

$$\begin{aligned} x &= L \ln tg(q_B/2) + L \cos q_B; \\ y &= L \sin q_B \end{aligned}$$

З параметричних рівнянь трактриси очевидно, що параметр q_B змінюється в інтервалі: $0 < q_B < \pi$:

$$q_B \rightarrow \begin{cases} 0, \text{ при } x \rightarrow -\infty \text{ і } y \rightarrow 0; \\ \pi, \text{ при } x \rightarrow \infty \text{ і } y \rightarrow 0; \\ \pi/2, \text{ при } x \rightarrow 0 \text{ і } y \rightarrow L. \end{cases}$$

Враховуючи отриману залежність, справедливим є твердження, що вісь абсцис є асимптотою трактриси. Для всіх значень q_B та $(\pi - q_B)$ мають однакові значення y , а значення x відрізняються лише знаком, оскільки трактриси симетрична осі ординат. Як наслідок, при симетричному русі буксирувальника маломорехідний об'єкт має симетрично відхилитися від курсу буксирувальника (рис. 7).

Розглянемо інші властивості трактриси прямої лінії:

1. Визначення радіуса кривизни у довільній точці трактриси:

Радіус кривизни дорівнює $R_K = dS/q_B$, де

$$dS^2 = dx^2 + dy^2 = L^2(\cos^4 q_B / \sin^2 q_B) d^2 q_B + L^2 \cos^2 q_B d^2 q_B = L^2 ctg^2 q_B d^2 q_B.$$

Звідси отримаємо вираз:

$$dS = L ctg q_B dq_B. \tag{13}$$

Радіус кривизни в довільній точці трактриси можна записати так:

$$R_K = L ctg q_B. \tag{14}$$

Подальшим кроком є визначення координат центру кривизни трактриси, використовуючи радіус кривизни. Графічно для довільної точки трактриси визначаємо координати.

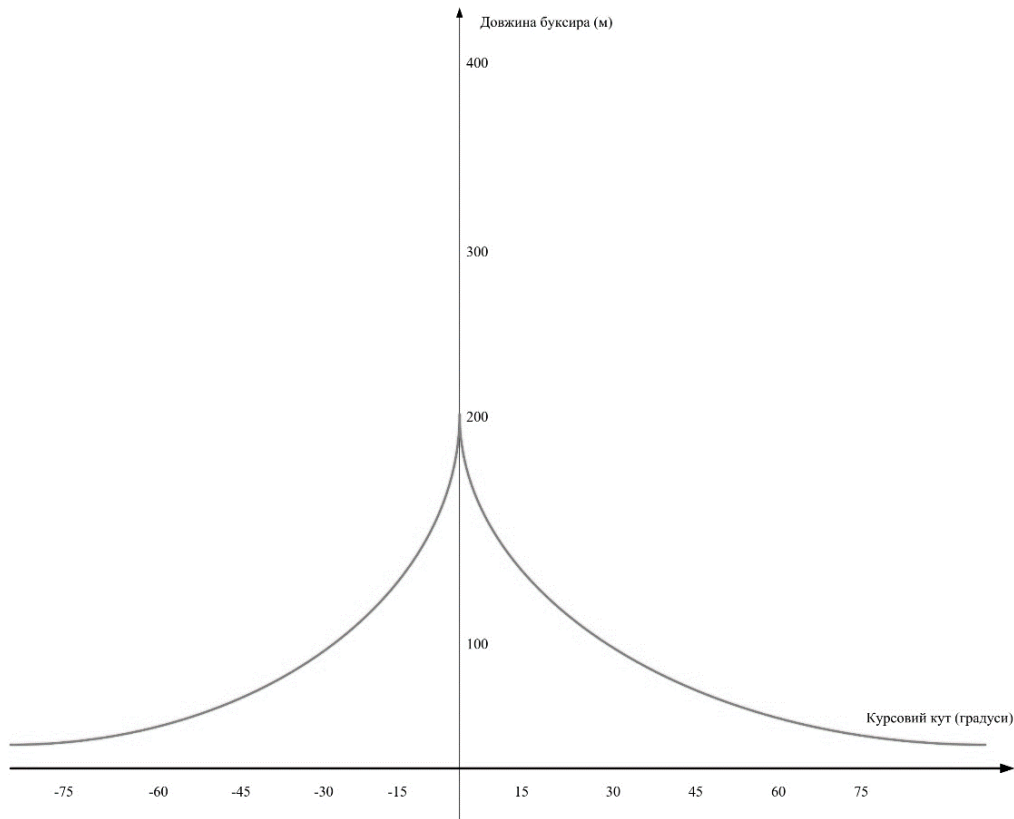


Рис. 7 – Відхилення від кутового курсу при довжині буксира $L = 200$ м

Покрокове визначення координат центру кривизни трактриси складається у такому:

– нанесення із точки A на осі абсцис відмітки на траєкторії руху маломорехідного об'єкта в точці M із радіусом $L = AM$;

– порівняння лінії перетину з перпендикуляром AN у точці N .

Оскільки $MN = L \operatorname{ctg} q_B$, то точка N є центром кривизни трактриси.

Аналогічно визначимо координати центру кривизни, спираючись на рис. 8:

$$x_K = x - L \cos q_B = L \ln \operatorname{tg} q_B;$$

$$y_K = L \operatorname{cosec} q_B.$$

Визначимо еволюту трактриси, використовуючи вираз для координат центру кривизни. Якщо кут q_B розглядати як параметр, то можна отримати параметричне рівняння еволюти трактриси. Виключаючи із цих виразів параметр q_B , знайдемо:

$$y_e = (L/2)(\exp(x/L) + \exp(-x/L)) = Lch(x/L).$$

З аналізу виразу слідує, що еволютою трактриси є ланцюгова лінія. Як наслідок, трактриса є евольвеною ланцюгової лінії (див. рис. 8).

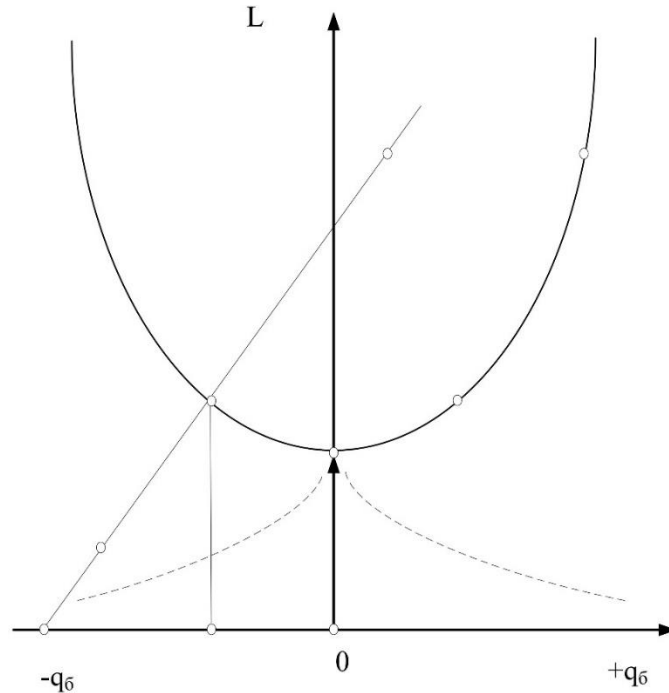


Рис. 8 – Евольвента ланцюгової лінії, де L – довжина буксирної лінії, [м]; $-q_B, +q_B$ – курсові кути на буксирований об’єкт

Довжина дуги трактриси, відкладена відносно точки $M_0(0, L)$ відповідної до довільного значення q_B , дорівнює величині (13), тобто

$$S = \int_{x/2}^{q_B} L \operatorname{ctg} q_B dq_B = -L \ln \sin q_B. \quad (15)$$

Натуральне рівняння трактриси b можна одержати, якщо усунути із виразів (14) та (15) параметр q_B :

$$R = L(\exp(2S/L) - 1)^{1/2}.$$

Розглянемо кінематичні властивості трактриси прямої лінії.

Нехай точка A рухається вздовж прямої з постійним вектором швидкості V . Визначимо параметричні рівняння руху точки B :

$$\begin{aligned} x_B &= x_A - L \cos(\pi - q_B), \\ y_B &= L \sin q_B \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} x_B &= x_A - L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned} \quad (16)$$

Якщо $x_A = vt$, де t – час, то система рівнянь (16) матиме вигляд

$$\begin{aligned} x_B &= vt - L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned} \quad (17)$$

Для початкових умов $x = 0, q_B = \pi/2$ рівняння трактриси у параметричній формі доцільно записати як:

$$\begin{aligned} x_B &= L \ln \operatorname{tg}(q_B/2) + L \cos q_B, \\ y_B &= L \sin q_B. \end{aligned}$$

Підставляючи дві останні системи рівностей, одержимо

$$vt = L \ln \operatorname{tg}(q_B/2)$$

або

$$tg(q_B/2) = \exp(vt/L).$$

Використовуючи відомі тригонометричні формули, опишемо $\sin q_B$ і $\cos q_B$:

$$\begin{aligned} \sin q_B &= (2 \exp vt/L)(1 + \exp 2vt/L), \\ \cos q_B &= (1 - \exp 2vt/L)(1 + \exp 2vt/L). \end{aligned}$$

Зазначимо, що праві частини формул є гіперболічними функціями

$$\begin{aligned} \sin q_B &= \operatorname{sch}(vt/L), \\ \cos q_B &= -\operatorname{th}(vt/L). \end{aligned}$$

Оперуючи останніми формулами, отримаємо параметричні рівняння руху сейсмічного обладнання:

$$\begin{aligned} x_B &= vt - L \operatorname{th}(vt/L), \\ y_B &= L \operatorname{sch}(vt/L). \end{aligned} \quad (18)$$

Рівняння руху сейсмічного обладнання дозволяють визначити проекції швидкості на осі координат:

$$\begin{aligned} v_{Bx} &= dx/dt = v_t h^2(v_t/L), \\ v_{By} &= dy/dt = -v \operatorname{sch}(-v_t/L)/ch^2(v_t/L) \end{aligned}$$

і, відповідно, модуль вектора швидкості:

$$v_B = v_t h(v_t/L) = -v \cos q_B.$$

Використовуючи систему рівностей (18), можна знайти прискорення точки B , відповідно, на осях OX і OY :

$$\begin{aligned} w_{Bx} &= d^2x/dt^2 = (2v^2/L)\operatorname{sch}^2(v_t/L)\operatorname{th}(v_t/L), \\ w_{By} &= d^2y/dt^2 = (v^2/L)\operatorname{sch}(v_t/L)(2\operatorname{th}^2(v_t/L) - 1). \end{aligned}$$

Модуль прискорення в точці B матиме вигляд:

$$w_B = (v^2/L)\operatorname{sch}(v_t/L) = (v^2/L).$$

Для дотичного прискорення в цій точці отримаємо

$$w_{Bt} = (v^2/L)\operatorname{sch}^2(v_t/L),$$

а для нормального прискорення справедливим є вираз

$$w_{Bn} = (v^2/L)\operatorname{sch}(v_t/L)\operatorname{th}(v_t/L).$$

Враховуючи взаємозв'язок між тригонометричними та гіперболічними функціями, отримаємо

$$q_B = \arcsin(\operatorname{sch}(v_t/L)).$$

Кутова швидкість і кутове прискорення відрізка AB дорівнює:

$$\begin{aligned} \omega &= -(v/L)\operatorname{sch}(v_t/L), \\ \varepsilon &= (v^2/L^2)\operatorname{th}(v_t/L)\operatorname{sch}(v_t/L). \end{aligned}$$

Враховуючи властивості гіперболічних функцій, швидкість маломорехідного об'єкта при буксированні здатна змінюватися від нуля при $t = 0$ до значення v при $t \rightarrow \infty$.

Аналогічно методу визначення швидкості маломорехідного об'єкта при буксированні, можна визначити інші кінематичні характеристики, наприклад, траєкторію руху маломорехідного об'єкта при його буксированні з врахуванням відхилення судна-буксира. Визначені особливості кінематичного стану маломорехідного об'єкта дозволять врахувати його параметри при роботі проекту буксировання й плану буксировання лінією із врахуванням умов навколишнього середовища із дотриманням норм навігаційної безпеки.

Висновки

Таким чином, одержав подальший розвиток метод визначення траєкторії сейсмічного обладнання при стаціонарному характері морського буксирування, який на відміну від відомих, відрізняється заміщенням руху складу суден буксирувальника та сейсмічного обладнання на їх характерні точки, що дозволяє при швидких і помірних змінах курсу буксирувальника розглядати траєкторію сейсмічного обладнання як плоску криву, визначити при буксируванні різні кінематичні характеристики маломорехідного об'єкта і враховувати їх при розробці проекту буксирування для різноманітних умов навколишнього середовища із дотриманням норм навігаційної безпеки.

Перелік використаних джерел:

1. Технологія видобування нафти / Орловський В.М., Білецький В.С., Вітрик В.Г., Сіренко В.І. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, НТУ «ХПІ», ТОВ НТП, «Бурова техніка», Львів, «Новий Світ – 2000», 2022. 308 с.
2. Голиков В.А., Мальцев А.С. Концепция создания системы гарантированной безопасности управления морскими подвижными объектами. *Судовождение*. 2007. Вып. 13. С. 58-74.
3. Згуровський М.З., Панкратова Н.Д. Основи системного аналізу. Київ : Вид. група BHV, 2007. 546 с.
4. Polydorides N., Storteig E., Lionheart W. Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics. *Ocean Engineering*. 2008. Vol. 35. No. 14-15. Pp. 1429-1438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2008.07.00>.
5. Ткаченко І.О. Ризики у транспортних процесах : навч. посібник. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 114 с.
6. Aven T. Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*. 2016. Vol. 253. Pp. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>.
7. ISO 31000:2018 Risk management – Guidelines. 2018. 16 p.
8. Risk focus: loss of power. URL: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/03/Main-engine-Risk-Focus-Loss-of-Power.pdf> (дата звернення: 15.04.2023).
9. Ларін О.О., Водка О.О., Потопальська К.Є. Комп'ютерне та математичне моделювання в задачах прогнозування надійності при поступових відмовах : монографія. Харків : Юрайт, 2020. 232 с.
10. Моделювання складних систем : монографія / за заг. ред. В.М. Соловйова. Черкаси: Брама, видавець Третьяков О. М., 2015. 354 с.
11. Lu S., Pereverzev V. Numerical differentiation from the view point of regularization theory. *Mathematics of Computation*. 2006. Vol. 75. No. 256. Pp. 1853-1870. DOI: <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-06-01857-6>.

References:

1. V.M. Orlovskiy, V.S. Biletskyi, V.H. Vitryk, and V.I. Sirenko, *Tekhnolohiia vydobuvannia nafty* [Oil extraction technology]. Kharkiv, Ukraine: KhNUMH im. O. M. Beketova Publ., NTU «KhPI» Publ., TOV NTP Publ., «Burova tekhnika» Publ., Lviv: «Novyi Svit – 2000» Publ., 2022. (Ukr.)
2. V.A. Holykov, and A.S. Maltsev, «Kontseptsiya sozdaniya systemy harantirovannoi bezopasnosti upravleniya morskymu podvyzhnimu ob'ektam» [«The concept of creating a system of guaranteed safety for managing marine mobile objects»], *Sudovozhdenye – Shipping & Navigation*, vol. 13, pp. 58-74, 2007. (Rus.)
3. M.Z. Zghurovskiy, and N.D. Pankratova, *Osnovy systemnoho analizu* [Fundamentals of system analysis]. Kyiv, Ukraine: BHV Publ., 2007. (Ukr.)
4. N. Polydorides, E. Storteig, and W. Lionheart, «Forward and inverse problems in towed cable hydrodynamics», *Ocean Engineering*, vol. 35, no. 14-15, pp. 1429-1438, 2008. doi: **10.1016/j.oceaneng.2008.07.00**.
5. I.O. Tkachenko, *Ryzyky u transportnykh protsesakh : navchalnyi posibnyk* [Risks in transport processes: a study guide]. Kharkiv, Ukraine: KhNUMH im. O. M. Beketova Publ., 2017. (Ukr.)

6. T. Aven, «Risk assessment and risk management: review of recent advances on their foundation», *European Journal of Operational Research*, vol. 253, pp. 1-13, 2016. doi: **10.1016/j.ejor.2015.12.023**.
7. *Risk management – Guidelines*, ISO 31000:2018, 2018.
8. Risk focus: loss of power [Online]. Available: <https://maritimecyprus.com/wp-content/uploads/2022/03/Main-engine-Risk-Focus-Loss-of-Power.pdf>. Accessed on: April 15, 2023.
9. O.O. Larin, O.O. Vodka, and K.Ie. Potopalska, *Kompiuterne ta matematychni modeliuvannia v zadachakh prohnozuvannia nadiinosti pry postupovykh vidmovakh : monohrafiia* [Computer and mathematical modeling in the problems of predicting reliability with gradual failures: monograph]. Kharkiv, Ukraine: Yurait Publ., 2020. (Ukr.)
10. *Modeliuvannia skladnykh system : monohrafiia* [Modeling of complex systems: monograph], V.M. Soloviov, Ed., Cherkasy, Ukraine: Tretiakov O.M. Publ., 2015. (Ukr.)
11. S. Lu, and V. Pereverzev, Numerical differentiation from the view point of regularization theory, *Mathematics of Computation*, vol. 75, no. 256, pp. 1853-1870, 2006. doi: **10.1090/S0025-5718-06-01857-6**.

Рецензент: А.І. Головань
канд. техн. наук, доц., ОНМУ

Стаття надійшла 15.08.2023
Стаття прийнята 19.09.2023

УДК 629.5.05

doi: 10.31498/2225-6733.47.2023.300121

© Мельник О.В.¹, Сорока В.В.²

ВІБРОДІАГНОСТИКА ГОЛОВНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ СУДЕН: ВДОСКОНАЛЕННЯ ТА ІНТЕГРАЦІЯ МЕТОДІВ

Дослідження присвячено розробці комплексного підходу вібродіагностики головної енергетичної установки засобів водного транспорту. Удосконалюється метод автоматичної обробки вузькосмугових спектрів. Удосконалюється метод автоматичної адаптації порогових значень для своєчасного виявлення зміни технічного стану на фоні характерних для суднових умов природних монотонних змін вібраційних параметрів. У ході дослідження сформульовані особливості спектрів вібраційних сигналів роторного обладнання та проведено їх аналіз з точки зору оцінки параметрів діагностично значимих компонентів. Для оцінки поточної працездатності СЕУ на судах традиційно використовуються автоматичні системи централізованого контролю та управління. Їх основним призначенням є оцінка якості виконання СЕУ заданих експлуатаційних режимів. Але дані системи не дозволяють вирішити завдання завчасного прогнозування втрати працездатності найбільш навантажених і схильних до відмови елементів СЕУ – роторних машин, оскільки контрольовані параметри технологічних процесів є або інерційними і не змінюються синхронно з розвитком несправностей, або не реагують на розвиток ряду небезпечних дефектів аж до наступу незворотних наслідків. Отримав подальший розвиток метод автоматичної діагностики на основі результатів моніторингу параметрів вібрації різної природи та оцінки діагностичної значущості їх зміни на фоні природних монотонних флуктуацій.

¹ канд. техн. наук, доцент, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0089-6535, melnik81@ukr.net

² здобувач ступеня доктора філософії, Державний університет інфраструктури та технологій, м. Київ, ORCID: 0000-0002-7581-7141