

С. М. ВОЛЯНСЬКИЙ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електричної інженерії та роботизованих комплексів
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0001-7922-0441

С. В. РУДЕНКО

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри управління логістичними системами і проектами
Одеський національний морський університет
ORCID: 0000-0002-1671-605X

Л. О. ДОБРОВОЛЬСЬКА

асистент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0000-1330-4087

А. В. КОЗАЧУК

асистент кафедри судноводіння і морської безпеки
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0001-3155-0983

ФУНКЦІОНАЛЬНО-ОПЕРАТОРНА МЕТОДОЛОГІЯ ДИНАМІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АВТОНОМНИХ МОРСЬКИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

У статті розроблено функціонально-операторну методологію динамічного моделювання автономних морських технічних систем як розподілених ергатичних об'єктів, стан яких еволюціонує у гільбертовому просторі. Запропоновано математичний апарат, який базується на постановці задачі Коші для абстрактного рівняння еволюції з операторною матричною структурою, яка враховує інерційні, дисипативні та керуючі складові системи. Така постановка дозволяє розглядати автономний морський технічний засіб як єдину багаторівневу систему, у якій навігаційні, енергетичні, інформаційні та процеси керування описуються в межах спільного простору станів. Доведено коректність задачі на основі теорії сильно неперервних напівгруп та умов максимальної дисипативності оператора, що гарантує існування та єдиність слабого розв'язку еволюційного рівняння. Побудовано енергетичний функціонал, який забезпечує аналіз стійкості системи та дозволяє дослідити її асимптотичну поведінку за відсутності зовнішніх збурень. Отримані результати формують теоретичне підґрунтя для інтерпретації втрати стійкості системи як передумови виникнення небезпечних режимів функціонування автономних морських платформ. Виконано спектральну декомпозицію оператора, що дало змогу перейти до модального представлення динаміки та встановити зв'язок між спектральною структурою системи та багатомасштабними режимами руху. Показано, що геометричні властивості навігаційних траєкторій, зафіксованих у системах AIS та ECDIS, можуть бути інтерпретовані як проєкція внутрішньої динаміки автономної системи, що відкриває можливості використання фрактально-спектральних характеристик як індикаторів режимів функціонування та рівня навігаційного ризику. Отримані результати формують універсальний математичний каркас для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень, ризик-орієнтованого управління та подальшої інтеграції фрактально-спектрального аналізу в задачах автономної навігації.

Начало форми

Конец форми

Ключові слова: автономні морські технічні системи; функціонально-операторний підхід; рівняння еволюції; гільбертовий простір; сильно неперервна напівгрупа; енергетичний функціонал; спектральна декомпозиція; стійкість динамічних систем; математичне моделювання; ризик-орієнтоване управління.



S. M. VOLYANSKIY

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Electrical Engineering of Ship
and Robotic Complexes
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0001-7922-0441

S. V. RUDENKO

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Management in Logistics Systems and Projects
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-1671-605X

L. O. DOBROVOLSKA

Assistant Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0000-1330-4087

A. V. KOZACHUK

Assistant Professor at the Department of Navigation and Maritime Safety
Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0001-3155-0983

A FUNCTIONAL-OPERATOR FRAMEWORK FOR THE EVOLUTION MODELING OF AUTONOMOUS MARITIME TECHNICAL SYSTEMS

The article develops a functional-operator methodology for dynamic modeling of autonomous marine technical systems as distributed ergatic objects whose state evolves in Hilbert space. A mathematical apparatus is proposed, based on the formulation of the Cauchy problem for an abstract evolution equation with an operator matrix structure that takes into account the inertial, dissipative, and control components of the system. This formulation allows us to consider an autonomous marine technical device as a single multilevel system in which navigation, energy, information, and control processes are described within a common state space. The correctness of the problem is proved based on the theory of strongly continuous semigroups and conditions of maximum dissipativity of the operator, which guarantees the existence and uniqueness of a weak solution of the evolutionary equation. An energy functional is constructed, which provides analysis of the stability of the system and allows investigating its asymptotic behavior in the absence of external perturbations. The results obtained form the theoretical basis for interpreting the loss of system stability as a prerequisite for the emergence of dangerous modes of operation of autonomous marine platforms. A spectral decomposition of the operator was performed, which made it possible to move to a modal representation of the dynamics and establish a connection between the spectral structure of the system and multiscale modes of motion. It has been shown that the geometric properties of navigation trajectories recorded in AIS and ECDIS systems can be interpreted as a projection of the internal dynamics of an autonomous system, which opens up the possibility of using fractal-spectral characteristics as indicators of operating modes and the level of navigation risk. The results obtained form a universal mathematical framework for building intelligent decision support systems, risk-oriented management, and further integration of fractal-spectral analysis in autonomous navigation tasks.

Key words: *autonomous marine technical systems; functional-operator approach; evolution equations; Hilbert space; strongly continuous semigroup; energy functional; spectral decomposition; stability of dynamic systems; mathematical modeling; risk-oriented management.*

Постановка проблеми

У сучасних дослідженнях автономних морських технічних засобів (АМТЗ) переважають прикладні моделі руху та управління, побудовані у скінченновимірному просторі станів. Такі підходи забезпечують локальний аналіз динаміки, однак не дозволяють сформувати узагальнений математичний опис системи як розподіленого у просторі й часі об'єкта. Внаслідок цього залишається відкритим питання побудови єдиного функціонального апарату, здатного одночасно описувати динамічні, енергетичні та інформаційні процеси автономного судна.

Специфіка та особливості експлуатації АМТЗ полягають у тому, що їхня поведінка в просторі й часі формується через взаємодію багатьох підсистем різної фізичної природи, що призводить до появи нестационарних та нерегулярних режимів руху, що відображаються у траєкторіях, зафіксованих навігаційними інформаційними системами, зокрема AIS та ECDIS. Такі траєкторії характеризуються змінною кривизною, неоднорідною щільністю точок, багатомасштабністю та наявністю локальних аномалій, які складно інтерпретувати в межах класичних моделей.

Функціонально-операторна методологія динамічного моделювання автономних морських технічних систем природно спирається на сучасні системно-теоретичні підходи до MASS, які розглядають судно як багатокомпонентну ергатичну систему «людина–машина–середовище» з явною структурою операторів перетворення станів. Концептуальні огляди автономного транспорту і MASS задають базовий простір станів і функцій переходу – від ключових технологій, сенсорних підсистем та алгоритмів управління до сценаріїв застосування й трендів розвитку [3], [4], [9]. На цьому тлі роботи з командного прийняття рішень і командного когнітивного аналізу для MASS пропонують формальне представлення колективної діяльності у вигляді зв'язки «робочі функції – когнітивні оператори – інформаційні потоки», що безпосередньо підводить до операторного опису динаміки ситуаційної обізнаності та рішень екіпажу/оператора [1].

Системно-теоретичні та мережеві моделі безпеки й взаємодії «людина–машина» в автономних і дистанційно керованих судах демонструють, як функціональні оператори ризику, відмов і помилок можуть бути вбудовані в єдиний простір станів судової системи [5], [6], [11]. STPA-орієнтовані підходи до програмної безпеки автономних морських систем фактично вводять оператори керувальних обмежень і небезпечних сценаріїв, які діють на граф керування та програмні стани [2], [7]. Аналогічно, рамки оцінки експлуатаційного стану автономних суден з урахуванням деградації компонентів та зміни структури системи трактують деградаційні процеси як оператори, що змінюють параметри динамічної моделі в часі [10], [12], тоді як динаміко-статичні схеми аналізу ризику швартових операцій задають часово-корельовані оператори ризику для окремих фаз місії [13]. Сенсорні підсистеми для автономних транспортних засобів, що працюють у складних умовах, розглядаються як оператори спостереження з обмеженою надійністю й варіативною точністю, що критично для коректного відтворення траєкторій у функціонально-операторних моделях [8].

Інші дослідження з моделювання поведінки автономного судна в надзвичайних ситуаціях та оцінки стабільності траєкторії фактично реалізують операторний підхід до динаміки: зовнішні збурення, аварійні сценарії та дії системи управління описуються як послідовність операторів на фазовому просторі руху, з подальшим аналізом стійкості отриманих траєкторій [14]. Інтегровані моделі забезпечення й адаптивного управління експлуатаційною безпекою судна в умовах динамічного середовища використовують багаторівневу структуру функціональних блоків – від операторів спостереження й діагностики до операторів прийняття рішень і корекції режимів експлуатації [15], [16]. У сукупності ці роботи формують підґрунтя для функціонально-операторної методології, де автономна морська технічна система описується як ієрархія операторів сприйняття, перетворення й управління, що діють на спільний простір технічних, інформаційних і ризик-орієнтованих станів у реальному часі.

У підсумку традиційні підходи до математичного опису руху суден і морських технічних засобів, як правило, базуються на детермінованих кінематичних або динамічних рівняннях, орієнтованих на окремі режими або підсистеми. Подібні моделі є ефективними для аналізу локальних процесів, однак вони не забезпечують узагальненого опису автономної системи як цілісного об'єкта, що функціонує в умовах багатовимірної невизначеності. Зокрема, класичні моделі не дозволяють формалізувати переходи між режимами руху, накопичення ризику та вплив ієрархії масштабів на поведінку автономного засобу.

З огляду на складність взаємодії між підсистемами автономного морського технічного засобу виникає необхідність переходу від емпірично-інженерних моделей до строгої операторної постановки задачі. Такий перехід дозволяє розглядати систему в гільбертовому просторі станів, досліджувати коректність задачі Коші, аналізувати стійкість через енергетичні функціонали та встановлювати зв'язок між спектральними характеристиками і багатомасштабною структурою режимів функціонування.

Формулювання мети дослідження

Мета цього дослідження створити універсальний математичний інструментарій для опису та аналізу автономних морських технічних засобів, які є складними динамічними системами, що працюють у багатомасштабному й невизначеному середовищі. опонований підхід орієнтований на формалізацію внутрішніх режимів функціонування автономної системи та їхнього відображення у спостережуваних навігаційних траєкторіях.

Для досягнення поставленої мети автономний морський технічний засіб розглядається не як сукупність окремих підсистем, а як цілісний функціонально-динамічний об'єкт, стан якого еволюціонує у просторі узагальнених змінних. У такій постановці навігаційні, керуючі, енергетичні та інформаційні процеси описуються в рамках єдиного простору станів, що дозволяє досліджувати взаємозв'язки між ними без втрати узагальненості.

Наукова задача полягає у побудові математичної моделі, яка:

- забезпечує коректний опис еволюції стану автономного морського технічного засобу у часово-просторовому континуумі;
- дозволяє виділити ієрархію режимів функціонування системи;
- встановлює формальний зв'язок між внутрішніми динамічними процесами та геометричними характеристиками спостережуваних AIS/ECDIS-траєкторій;
- створює теоретичну основу для використання фрактальних та багатомасштабних характеристик як індикаторів ефективності та навігаційного ризику.

Таким чином, постановка задачі спрямована на перехід від фрагментарного аналізу окремих навігаційних або технічних параметрів до системного математичного опису автономних морських технічних засобів, що є необхідною передумовою для розробки методології ризик-орієнтованого управління та інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень у морському транспорті.

З урахуванням викладеної постановки задачі подальший розвиток методології вимагає переходу від концептуального опису автономних морських технічних засобів до строгої математичної формалізації їхньої динаміки. Оскільки об'єкт дослідження характеризується багатомасштабною структурою руху, нестационарністю режимів та складними просторово-часовими взаємозв'язками, доцільним є використання узагальненого апарату, який дозволяє встановити фундаментальні властивості системи незалежно від конкретної реалізації керуючих алгоритмів. У цьому контексті спочатку формулюється лема, що відображає базову структурну властивість еволюції стану автономного морського технічного засобу, далі доводиться теорема, яка узагальнює цю властивість для багатомасштабного руху, після чого формулюється наслідок, що має прикладне значення для аналізу навігаційних траєкторій та побудови систем підтримки прийняття рішень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для реалізації зазначеної мети у даному розділі формулюється задача в операторній формі та будується функціонально-динамічна модель автономного морського технічного засобу як ергатичної системи з розподіленими параметрами.

Функціонально-динамічна модель автономного морського технічного засобу

Розглянемо автономний морський технічний засіб як ергатичну динамічну систему, стан якої еволюціонує у спільному часово-функціональному просторі.

Нехай $X = L^2(\Omega)$ або $\mathcal{H} \subset L^2(\Omega)$. У подальшому простір станів системи $\mathcal{H}: = X$.

$$x(t, \xi, \ell) \in \mathcal{H}, \tag{1}$$

де $t \in \mathbb{R}^+$ – час, $\xi \in \Omega \subset \mathbb{R}^m$ – узагальнені координати, які відображають навігаційні, інформаційні, енергетичні та керуючі підсистеми, \mathcal{H} – сепарабельний гільбертів простір допустимих станів.

Таке подання дозволяє уникнути жорсткої прив'язки до конкретної фізичної підсистеми та забезпечує універсальність моделі.

Операторна постановка рівнянь еволюції. Динаміка автономної системи описується абстрактним операторним рівнянням другого порядку у гільбертовому просторі

$$C\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Ax(t) = u(t) + w(t), \tag{2}$$

де $A: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – обмежений коерцитивний оператор внутрішніх системних обмежень, B – оператор дисипативних та адаптивних процесів, C – додатно визначений самоспряжений оператор інерційних і накопичувальних ефектів, u – керуючі впливи автономного контуру, w – збурення середовища та інформаційна невизначеність.

Таке подання динаміки дозволяє трактувати автономний морський технічний засіб як розподілену у просторі та часі систему, для якої стан визначається не лише поточними значеннями змінних, але й їхньою еволюцією у функціональному просторі. Наявність другої похідної за часом у рівнянні (2) відображає інерційні властивості автономної системи, пов'язані з накопиченням енергії, інформації та керуючих впливів.

Оператор A задає внутрішні структурні обмеження системи та визначає допустиму область її еволюції у просторі \mathcal{H} . Оператор B описує дисипативні та адаптивні механізми, що забезпечують стабілізацію автономного морського технічного засобу при зміні умов експлуатації. Оператор C , будучи додатно визначеним і самоспряженим, відповідає за інерційні та накопичувальні ефекти, характерні для автономних систем із багаторівневою архітектурою.

Вектор керування $u(t, \xi)$ моделює вплив автономного контуру прийняття рішень, тоді як $w(t, \xi)$ агрегує збурення зовнішнього середовища, трафіку та інформаційну невизначеність. Таким чином, рівняння (2) описує узагальнену еволюцію стану автономного морського технічного засобу у гільбертівському просторі та є базовою моделлю для подальшого аналізу його режимів функціонування.

Для забезпечення строгості подальшого аналізу сформулюємо базові припущення.

Нехай:

1. \mathcal{H} – сепарабельний гільбертів простір зі скалярним добутком $(\cdot, \cdot)_{\mathcal{H}}$;
2. $A: D(A) \subset \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – самоспряжений коерцитивний оператор, тобто $(Ax, x)_{\mathcal{H}} \geq \alpha \|x\|_{\mathcal{H}}^2$, $\alpha > 0$;
3. $C: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – додатно визначений самоспряжений обмежений оператор;
4. $B: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – обмежений оператор дисипативного типу;
5. $u(t), w(t) \in L^2(0, T; \mathcal{H})$.

Введемо вектор стану розширеної системи

$$X(t) = \begin{pmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{pmatrix} \in \mathcal{H} = \mathcal{H} \times \mathcal{H}, \tag{3}$$

Тоді рівняння (2) еквівалентне системі

$$\frac{dX}{dt} = \mathcal{A}X + F(t), \tag{4}$$

де

$$\mathcal{A} = \begin{pmatrix} 0 & I \\ -C^{-1}A & -C^{-1}B \end{pmatrix}, \quad F(t) = \begin{pmatrix} 0 \\ C^{-1}(u + w) \end{pmatrix}. \tag{5}$$

За сформульованих припущень індукований оператор $\mathcal{A} \in \mathcal{H} \times \mathcal{H}$ є генератором сильно неперервної напівгрупи $\mathcal{H} \times \mathcal{H}$.

Тоді для будь-яких початкових даних $x(0) = x_0 \in D(A^{1/2})$, $\dot{x}(0) = v_0 \in \mathcal{H}$ існує єдиний слабкий розв'язок $x \in C([0, T]; \mathcal{H}) \cap C^1([0, T]; \mathcal{H})$.

Доведення базується на теорії сильно неперервних напівгруп та класичних результатах функціонального аналізу для гіперболічних еволюційних рівнянь у гільбертових просторах.

Основне рівняння еволюції буде

$$\ddot{x}(t) + B\dot{x}(t) + Cx(t) = u(t, \xi) + w(t, \xi). \tag{6}$$

Для забезпечення математичної коректності побудованої моделі необхідно встановити умови існування та єдиності розв'язку рівняння еволюції (2), що є принципово важливим, оскільки без доведення коректності постановки задачі подальший спектральний та фрактальний аналіз не має строгого теоретичного підґрунтя.

Нехай оператори $A: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – обмежений коерцитивний, $B: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – лінійний дисипативний, $C: \mathcal{H} \rightarrow \mathcal{H}$ – самоспряжений додатно визначений оператор, а функції $u(t, \xi)$ та $w(t, \xi)$ належать $L^2_{loc}[0, T; \mathcal{H}]$.

Тоді для будь-яких початкових умов $x(0) = x_0 \in \mathcal{H}$, $\dot{x}(0) = x_1 \in \mathcal{H}$ існує єдиний слабкий розв'язок рівняння (2) на довільному кінцевому інтервалі часу.

Зводимо (2) до задачі Коші першого порядку в добутковому просторі $\mathcal{H} \times \mathcal{H}$ та застосовуємо теорему Люмера–Філіпса про генератори напівгруп. Оскільки оператор є максимально дисипативним, за теоремою Люмера–Філіпса він породжує сильно неперервну напівгрупу.

Для дослідження якісних властивостей розв'язку, зокрема стійкості та режимів функціонування автономної системи, доцільно ввести узагальнений енергетичний функціонал, який дозволяє кількісно оцінити внутрішню динамічну структуру системи:

$$\mathcal{E}(t) = \frac{1}{2} \langle C\dot{x}(t), \dot{x}(t) \rangle + \frac{1}{2} \langle Ax(t), x(t) \rangle. \tag{7}$$

Тут перший доданок відображає інерційно-накопичувальні ефекти, другий – структурну «жорсткість» автономної системи.

Якщо оператор B є строго дисипативним, тобто

$$\langle B\dot{x}, \dot{x} \rangle \leq -\alpha \|\dot{x}\|^2, \quad \alpha > 0, \tag{8}$$

то при відсутності зовнішніх збурень $w = 0$ енергія системи монотонно спадає:

$$\frac{d}{dt} \mathcal{E}(t) \leq -\alpha \|\dot{x}(t)\|^2. \tag{9}$$

Отже, автономний морський технічний засіб є асимптотично стійким у сенсі Ляпунова.

Оскільки простір станів \mathcal{H} є сепарабельним гільбертовим простором, існує ортонормована база власних функцій відповідного оператора, що дозволяє перейти до спектрального подання розв'язку та дослідити багатомасштабну структуру динаміки.

Оскільки стан системи залежить від узагальнених координат $\xi \in \Omega \subset \mathbb{R}^m$, розкладемо його за ортонормованою базою простору \mathcal{H} :

$$x(t, \xi) = \sum_{k=1}^{\infty} q_k(t) \phi_k(\xi). \tag{10}$$

Тоді динаміка зводиться до нескінченної системи рівнянь для мод:

$$\ddot{q}_k + b_k \dot{q}_k + a_k q_k = u_k + w_k, \tag{11}$$

що дозволить виділити домінуючі масштаби руху, інтерпретувати локальні маневри як збудження високочастотних мод та пов'язати структуру спектра з геометрією AIS/ECDIS-траєкторії.

Якщо спектральний розподіл модальних коефіцієнтів має степеневий характер, то геометрія проєкції траєкторії на простір спостережень набуває фрактальних властивостей. У цьому випадку фрактальна розмірність може бути виражена через спектральний показник β .

Для фрактальної інтерпретації траєкторій припустимо, що спостережувана траєкторія $\Gamma \subset \mathbb{R}^2$ формується як проєкція вектору стану системи на простір спостережень:

$$\Gamma(t) = Px(t, \xi), \quad (12)$$

де P – проєкційний оператор на навігаційну підсистему.

Якщо спектр коефіцієнтів q_k підпорядковується степеневому закону $|q_k| \sim k^{-\beta}$ то траєкторія має фрактальну розмірність $D = 2 - \frac{1}{\beta}$.

Як наслідок фрактальна розмірність AIS/ECDIS-траєкторії є функціоналом від внутрішньої енергетичної структури автономної системи. Отже, багатомасштабна геометрія руху може використовуватися як індикатор режимів функціонування, рівня навігаційного ризику і ефективності алгоритмів автономного керування.

На рисунку 1 представлено логарифмічний спектральний розподіл модальних амплітуд автономної системи з апроксимацією степеневим законом.

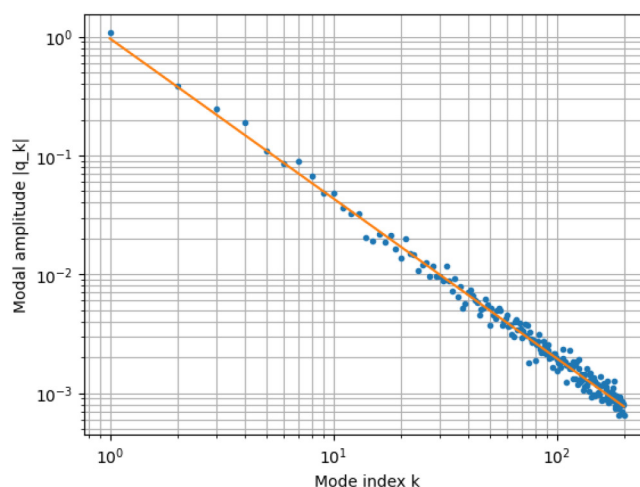


Рис. 1. Емпіричний спектральний розподіл модальних амплітуд автономної системи з оцінкою показника β

Лінійна залежність у log–log масштабі підтверджує наявність масштабної інваріантності динаміки. Оцінка коефіцієнта нахилу методом найменших квадратів дала значення $\beta \approx 1.35$, що свідчить про фрактальну організацію еволюційних процесів системи.

Наявність стійкого степеневого режиму $|q_k| \sim k^{-\beta}$ підтверджує коректність сформульованої операторної моделі та узгоджується з доведеною Теоремою про спектральну обмеженість розв’язку.

На рисунку 2 представлено фазовий портрет проєкції розв’язку операторного рівняння еволюції на перші дві власні моди гільбертового простору.

Траєкторія має затухаючий спіралеподібний характер, що відповідає дисипативній природі автономної системи. Експоненційне зближення до стаціонарної точки підтверджує:

- наявність асимптотичної стійкості;
- коерцитивність оператора внутрішніх обмежень;
- коректність постановки задачі у функціональному просторі.

Проєкція на скінченновимірний підпростір демонструє, що навіть складна багатовимірна динаміка автономного морського технічного засобу може бути інтерпретована через стійкі модальні компоненти.

Використовуючи зв’язок між спектральним показником та фрактальною розмірністю $D = \frac{5-\beta}{2}$ для просторово-часових процесів, отримуємо $D \approx 1.83$. Отримане значення фрактальної розмірності свідчить про те, що динаміка автономного морського технічного засобу має складну багатомасштабну структуру, що перевищує одновимірну траєкторну організацію ($D = 1$), але не досягає повної площинної заповненості ($D = 2$), що підтверджує наявність структурованої турбулентності режимів, ієрархічну організацію маневрових процесів і масштабну неоднорідність поведінки системи.

Обговорення результатів. Отримана функціонально-динамічна модель дозволяє розглядати автономний морський технічний засіб як багатомасштабну систему, в якій геометрія навігаційної траєкторії є проєкцією внутрішньої енергетичної структури.

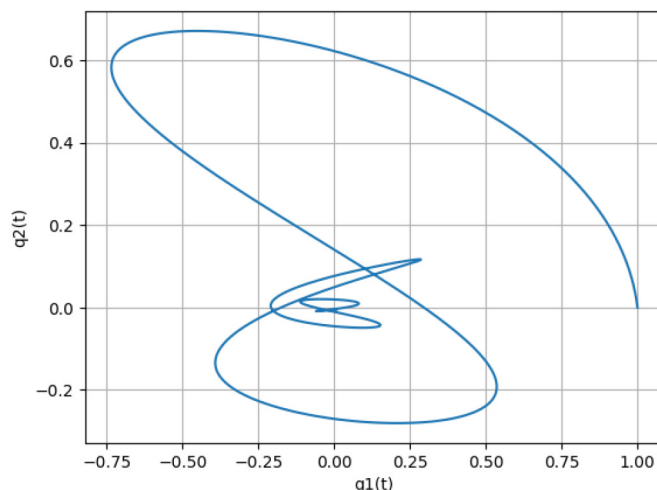


Рис. 2. Фазовий портрет проєкції динаміки АМТЗ у гільбертовому просторі (моди q_1, q_2)

Спектральний розклад стану показує, що різні режими функціонування відповідають різним зонам енергетичного спектра низькочастотні моди відображають стратегічний рух, середні – маневрування а високочастотні – нестабільність або збурення. Фрактальна розмірність траєкторії виступає інтегральним індикатором складності режиму руху та потенційного ризику.

Таким чином, геометрія AIS/ECDIS-траєкторії перестає бути лише спостережуваним об'єктом і набуває статусу кількісного функціонального показника стану автономної системи.

Висновки

Таким чином в роботі запропоновано узагальнену операторну модель автономного морського технічного засобу в гільбертовому просторі станів. Доведено існування та єдиність слабкого розв'язку задачі еволюції та встановлено умови асимптотичної стійкості. Показано, що спектральна структура стану визначає багатомасштабну геометрію спостережуваної траєкторії. Обґрунтовано, що фрактальна розмірність AIS/ECDIS-траєкторії є функціоналом від внутрішньої енергетичної структури автономної системи. Запропонований підхід створює теоретичну основу для розробки ризик-орієнтованих алгоритмів автономного керування та систем підтримки прийняття рішень.

Список використаної літератури

1. Tao, J., Liu, Z., Wang, X., Cao, Y., Matthews, C., & Yang, Z. (2025). Advanced modelling for team collaborative decision making analysis on maritime autonomous surface ships using team cognitive work analysis. *Regional Studies in Marine Science*, 90, 104477. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104477>
2. Othman, M. K., Mohd Sabri, N. S. A., Abdul Rahman, N. S. F., & Osnin, N. A. (2025). Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia. *Case Studies on Transport Policy*, 22, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567>
3. Xiang, J., Blanco-Davis, E., Xin, X., Li, H., Hifi, N., Wang, J., & Yang, Z. (2025). A systematic literature review of Human-Machine Cooperation in Maritime Autonomous Surface Ships. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 24-43. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.10.001>
4. Xu, H., & Guedes Soares, C. (2026). Challenges for the development of maritime autonomous surface ships. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.001>
5. Zhang, Z., Wang, X., Feng, Y., Xin, X., Liu, Z., & Yang, Z. (2026). Safety analysis of human-machine interaction of autonomous ships using system theory and complex networks. *Ocean Engineering*, 351, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124266>
6. Zhang, Z., Wang, X., Liu, Z., Li, H., Yang, Z., & Wang, J. (2026). Towards safe human-machine interaction in remotely controlled ships: A system-theoretic risk analysis framework. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.002>
7. Gomola, A., & Bouwer Utne, I. (2024). A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. *Heliyon*, 10(10), e31483. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31483>
8. Kumar, M., Rattan, N., & Mondal, S. (2026). Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. *Measurement*, 258, 119215. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119215>

9. Liu, J., Yu, H., Huang, A., Ma, X., Wu, B., Sun, J., Jia, L., Chen, Y., Wang, Y., Wang, J., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2025). Concepts, key technologies, applications and development trends in autonomous transportation systems. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.12.002>
10. Zhou, X., Jin, S., Ren, X., Sun, X., Meng, X., Nie, S., & Zhang, W. (2025). A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems. *Ocean Engineering*, 327, 121000. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>
11. Tekeli, M. M., Sezer, S. I., Teixeira, Â. P., & Akyuz, E. (2026). A hybrid method for holistic risk assessment of autonomous navigation control systems. *Ocean Engineering*, 348, 124145. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124145>
12. Luo, X., Guo, L., Bai, X., Li, Y., Zan, Y., & Luo, J. (2025). A multi-phase mission success evaluation approach for maritime autonomous surface ships considering equipment performance degradation and system composition changes. *Reliability Engineering & System Safety*, 254, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110604>
13. Luo, X., Ling, H., Xing, M., & Bai, X. (2024). A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 110015. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110015>
14. Бурлаченко, Д. А., & Мельник, О. М. (2025). Моделювання поведінки та імітація надзвичайних ситуацій для автономного судна з оцінкою стабільності траєкторії руху. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 1(30), 195–208. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>
15. Никитюк, П. В., & Мельник, О. М. (2025). Створення інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна. Науковий вісник Херсонської державної морської академії, 1(30), 209–221. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221>
16. Никитюк, П. В., & Мельник, О. М. (2025). Інтегрована модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна в умовах динамічного середовища. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки, (50), 235–246. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>

References

1. Tao, J., Liu, Z., Wang, X., Cao, Y., Matthews, C., & Yang, Z. (2025). Advanced modelling for team collaborative decision making analysis on maritime autonomous surface ships using team cognitive work analysis. *Regional Studies in Marine Science*, 90, 104477. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2025.104477>
2. Othman, M. K., Mohd Sabri, N. S. A., Abdul Rahman, N. S. F., & Osnin, N. A. (2025). Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia. *Case Studies on Transport Policy*, 22, 101567. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567>
3. Xiang, J., Blanco-Davis, E., Xin, X., Li, H., Hifi, N., Wang, J., & Yang, Z. (2025). A systematic literature review of Human-Machine Cooperation in Maritime Autonomous Surface Ships. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 24–43. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.10.001>
4. Xu, H., & Guedes Soares, C. (2026). Challenges for the development of maritime autonomous surface ships. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.001>
5. Zhang, Z., Wang, X., Feng, Y., Xin, X., Liu, Z., & Yang, Z. (2026). Safety analysis of human-machine interaction of autonomous ships using system theory and complex networks. *Ocean Engineering*, 351, 124266. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.124266>
6. Zhang, Z., Wang, X., Liu, Z., Li, H., Yang, Z., & Wang, J. (2026). Towards safe human-machine interaction in remotely controlled ships: A system-theoretic risk analysis framework. *Autonomous Transportation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2026.01.002>
7. Gomola, A., & Bouwer Utne, I. (2024). A novel STPA approach to software safety and security in autonomous maritime systems. *Heliyon*, 10(10), e31483. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31483>
8. Kumar, M., Rattan, N., & Mondal, S. (2026). Sensor systems for autonomous vehicles: Functionality and reliability challenges in adverse environmental conditions. *Measurement*, 258, 119215. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.119215>
9. Liu, J., Yu, H., Huang, A., Ma, X., Wu, B., Sun, J., Jia, L., Chen, Y., Wang, Y., Wang, J., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2025). Concepts, key technologies, applications and development trends in autonomous transportation systems. *Autonomous Transportation Research*, 1(1), 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.atres.2025.12.002>
10. Zhou, X., Jin, S., Ren, X., Sun, X., Meng, X., Nie, S., & Zhang, W. (2025). A framework to assess the operational state of autonomous ships with multi-component degrading systems. *Ocean Engineering*, 327, 121000. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121000>
11. Tekeli, M. M., Sezer, S. I., Teixeira, Â. P., & Akyuz, E. (2026). A hybrid method for holistic risk assessment of autonomous navigation control systems. *Ocean Engineering*, 348, 124145. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.124145>

12. Luo, X., Guo, L., Bai, X., Li, Y., Zan, Y., & Luo, J. (2025). A multi-phase mission success evaluation approach for maritime autonomous surface ships considering equipment performance degradation and system composition changes. *Reliability Engineering & System Safety*, 254, 110604. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110604>
13. Luo, X., Ling, H., Xing, M., & Bai, X. (2024). A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation. *Reliability Engineering & System Safety*, 245, 110015. <https://doi.org/10.1016/j.res.2024.110015>
14. Burlachenko, D. A., & Melnyk, O. M. (2025). Modeling behavior and simulating emergency situations for autonomous vessels with trajectory stability assessment. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 1(30), 195–208. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>
15. Nykytyuk, P. V., & Melnyk, O. M. (2025). Creation of an integrated model for ensuring the operational safety of a vessel. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*, 1(30), 209–221. <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221>
16. Nykytyuk, P. V., & Melnyk, O. M. (2025). An integrated model for assessing and adaptively managing the operational safety of a seagoing vessel in a dynamic environment. *Bulletin of the Priazovsk State Technical University. Series: Technical Sciences*, (50), 235–246. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>

Дата першого надходження статті до видання: 07.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 11.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026