

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-78>

УДК 629.5.05:519.87

### ВОЛЯНСЬКИЙ СЕРГІЙ

Одеський національний морський університет  
<https://orcid.org/0000-0001-7922-0441>  
e-mail: [vfogres@gmail.com](mailto:vfogres@gmail.com)

### ВОЛЯНСЬКА ЯНА

Національний університет кораблебудування  
імені адмірала Макарова  
<https://orcid.org/0000-0002-3010-1684>  
e-mail: [yanavolyanskaya@gmail.com](mailto:yanavolyanskaya@gmail.com)

### ДОБРОВОЛЬСЬКА ЛІАНА

Одеський національний морський університет  
<https://orcid.org/0009-0000-1330-4087>  
e-mail: [lina.dobrovolska@ukr.net](mailto:lina.dobrovolska@ukr.net)

### КОЗАЧУК АНТОН

Одеський національний морський університет  
<https://orcid.org/0009-0001-3155-0983>  
e-mail: [tonykozachuk@gmail.com](mailto:tonykozachuk@gmail.com)

## СТРУКТУРНО-ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЇ МОРСЬКОЇ ПЛАТФОРМИ З КІЛЬКІСНИМ АНАЛІЗОМ МІЖСИСТЕМНИХ ВПЛИВІВ

У роботі розроблено формалізовану системну модель автономної морської платформи як багатозв'язної динамічної структури з кількісно визначеними міжсистемними впливами. Платформу представлено у вигляді чотирьох взаємодіючих підсистем: енергетичної, рухової, інформаційно-діагностичної та управлінської, для яких визначено вектори станів та сформовано узагальнений простір станів. Міжсистемні взаємодії формалізовано у вигляді матриці впливів і зваженого орієнтованого графа, що дозволило кількісно оцінити структурну роль кожної підсистеми. Запроваджено показник сумарного вихідного впливу, який використано для визначення домінуючої підсистеми в структурі взаємодії. Результати аналізу підтверджують центральну роль управлінської підсистеми у формуванні замкненого адаптивного контуру керування та забезпеченні інтегральної ефективності функціонування автономної морської платформи в умовах середовищної невизначеності. Запропонований підхід створює методологічну основу для подальших досліджень стійкості, керованості та оптимізації режимів експлуатації автономних морських систем.

**Ключові слова:** автономна морська платформа, системна модель, міжсистемні впливи, зважений граф, матриця взаємодії, інтегральна ефективність, адаптивне управління.

### VOLYANSKYI SERGIY

Odessa National Maritime University  
VOLYANSKA YANA

Admiral Makarov National University  
of Shipbuilding

### DOBROVOLSKA LIANA, KOZACHUK ANTON

Odessa National Maritime University

## STRUCTURAL-DYNAMIC MODEL OF AN AUTONOMOUS MARITIME PLATFORM WITH QUANTITATIVE ANALYSIS OF INTERSYSTEMIC INFLUENCES

The paper develops a formalized system model of an autonomous marine platform (AMP) as a multi-connected dynamic structure with quantified intersystem impacts. The methodological basis of the study is a systematic approach to the analysis of AMP as a multi-level dynamic system with internal cause-and-effect relationships. The application of the proposed approach provides a transition from a qualitative description of the structure of an autonomous marine platform to its formalized model, suitable for further analysis of the stability and manageability of AMP, assessment of the integral efficiency of functioning and optimization of operating modes of autonomous marine systems. A combination of structural decomposition methods, matrix modeling, and oriented graph theory is used to formalize intersystem interactions. The autonomous marine platform is presented in the form of four interacting subsystems: energy, motor, information and diagnostic and management, for which state vectors are defined and a generalized state space is formed. Intersystem interactions are formalized in the form of a matrix of influences and a weighted oriented graph, which made it possible to quantify the structural role of each subsystem. This approach allows us to implement adaptive management, in which decisions are made not in isolation for individual modules, but taking into account their system interaction, which creates the basis for building a digital double of the platform and further implementing algorithms for optimizing and predicting the technical condition in real time. An indicator of the total initial impact is introduced, which is used to determine the dominant subsystem in the structure of interactions. The results of the analysis confirm the central role of the management subsystem in the formation of a closed adaptive control loop and ensuring the integral efficiency of the autonomous marine platform in conditions of environmental uncertainty.

**Keywords:** autonomous marine platform, system model, inter-system influences, weighted graph, interaction matrix, integral efficiency, adaptive control.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.02.2026  
Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026  
Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Волянський Сергій, Волянська Анна, Добровольська Ліана, Козачук Антон

## Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Традиційні підходи до аналізу роботи сучасних автономних морських платформ (АМП) які функціонують в умовах високого ступеню невизначеності середовища, змінності навантажень та обмежених енергетичних ресурсів – засновані на розгляді окремих підсистем, не забезпечують достатнього рівня адекватності при оцінюванні інтегральної ефективності. У зв'язку з цим виникає необхідність формалізації структури платформи як багатозв'язної динамічної системи з міжсистемними впливами, що можуть бути представлені у вигляді матричної та графової моделей.

### Аналіз досліджень та публікацій

У вивчених літературних джерелах простежується спільна ідея де автономні морські платформи розглядаються як складні багатокомпонентні системи, де взаємодія між підсистемами визначає їхню ефективність і безпеку. Так роботи [1, 3, 5, 7, 9] акцентують на структурній інтеграції сенсорів, алгоритмів управління та навігаційних модулів, показуючи, як динамічна модель платформи формується через поєднання різних технологічних рішень а дослідження [2, 4, 8, 11] демонструють міжсистемні впливи - від кіберзагроз і когнітивного навантаження операторів до соціально-організаційних факторів і багатоджерельної оцінки ризиків.

Інші публікації [12–15] додають до цього контексту приклади інтеграції ризик-аналізу, моделювання надзвичайних ситуацій та створення адаптивних моделей експлуатаційної безпеки суден. Вони показують, як кількісний аналіз міжсистемних впливів (енергоефективність ↔ ризики, стабільність траєкторії ↔ зовнішні збурення) може бути вбудований у структурно-динамічну модель автономної морської платформи. Таким чином, джерела разом формують цілісну картину: від концептуальних моделей і сенсорних технологій до практичних алгоритмів управління та оцінки безпеки.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** розроблення формалізованої системної моделі АМП як багатозв'язної динамічної структури з кількісно визначеними міжсистемними впливами.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати функціональну декомпозицію АМП з виділенням ключових підсистем;
- сформулювати узагальнений простір станів платформи;
- формалізувати міжсистемні впливи у вигляді матриці взаємодії;
- побудувати зважений орієнтований граф структурних взаємозв'язків;
- визначити кількісні показники структурного впливу підсистем;
- проаналізувати роль кожної підсистеми у формуванні інтегральної ефективності експлуатації.

Розв'язання зазначених задач дозволяє перейти від описової інтерпретації роботи автономної платформи до формалізованої моделі, придатної для подальшого аналізу стійкості та керованості.

Об'єктом дослідження є процес функціонування автономної морської платформи в умовах змінної невизначеності середовища та ресурсних обмежень.

Предметом дослідження є міжсистемні взаємодії енергетичної, рухової, інформаційно-діагностичної та управлінської підсистем, що визначають інтегральну ефективність експлуатації автономної морської платформи. Таке розмежування дозволяє сфокусувати дослідження саме на структурно-функціональних зв'язках, а не на окремих технічних характеристиках елементів платформи.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

1. Запропоновано системну модель АМП, що поєднує функціональну декомпозицію з формалізованою матрицею міжсистемних впливів.
2. Уперше представлено структуру взаємодій підсистем у вигляді зваженого орієнтованого графа з нормованими коефіцієнтами інтенсивності впливу.
3. Запроваджено кількісний показник сумарного вихідного впливу підсистеми, що дозволяє визначити її структурну роль у формуванні інтегральної ефективності.
4. Обґрунтовано домінуючу роль управлінської підсистеми як центру структурної керованості АМП.

Отримані результати створюють методологічну основу для подальших досліджень стійкості, оптимізації режимів та побудови цифрових двійників АМП.

### Виклад основного матеріалу

Методологічною основою дослідження є системний підхід до аналізу АМП як багаторівневої динамічної системи з внутрішніми причинно-наслідковими зв'язками. У роботі використано поєднання методів структурної декомпозиції, матричного моделювання та теорії орієнтованих графів для формалізації міжсистемних взаємодій.

На першому етапі виконано функціональну декомпозицію АМП з виділенням чотирьох базових підсистем: енергетичної, рухової, інформаційно-діагностичної та управлінської. Для кожної підсистеми визначено вектор стану, що дозволило сформулювати узагальнений багатовимірний простір станів. На другому етапі здійснено формалізацію міжсистемних впливів у вигляді матриці взаємодії, елементи якої відображають нормовану інтенсивність впливу однієї підсистеми на іншу. Такий підхід забезпечує можливість кількісної оцінки структурної ролі кожного функціонального модуля. На третьому етапі побудовано зважений орієнтований граф взаємодій, що дозволило провести аналіз структурної центральності підсистем та визначити домінуючі контури впливу в межах автономної платформи.

Застосування зазначеного підходу забезпечує перехід від якісного опису структури до формалізованої моделі, придатної для подальшого аналізу стійкості, керованості та оцінювання інтегральної ефективності функціонування.

Базова системна модель АМП розглядає її як ієрархічну динамічну систему, що складається з чотирьох взаємозв'язаних підсистем, взаємний вплив яких формалізується у спільному просторі станів.

Система 1 – Енергетична ( $S_1$ ) охоплює джерела енергії (акумулятори або генератори), електроніку, підсистему розподілу енергії та контроль споживання. Стан цієї системи описується вектором  $X_1 = \{E, T, I, \eta\}$ , де  $E$  – запас енергії,  $T$  – температурний режим,  $I$  – струмове навантаження,  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

Система 2 – Керування рухом ( $S_2$ ) включає пропульсивну установку, рульове управління, підсистему стабілізації руху та навігаційний модуль. Її стан задається вектором  $X_2 = \{V, \omega, \delta, a\}$ .

Система 3 – Інформаційно-діагностична ( $S_3$ ) об'єднує сенсорну підсистему, підсистему обробки сигналів, діагностичний модуль і цифрові двійники. Вектор стану має вигляд  $X_3 = \{D, Q, \Delta, P\}$ , де  $D$  – обсяг даних,  $Q$  – якість інформації,  $\Delta$  – похибка,  $P$  – прогноз.

Система 4 – Управління ( $S_4$ ) включає менеджер режимів, адаптивний регулятор, алгоритми RL / MPC / Fuzzy та систему підтримки прийняття рішень. Її стан описується вектором  $X_4 = \{U, R, \Phi, C\}$ .

Таким чином, АМП описується як система взаємодіючих підсистем зі структурованими векторами стану, що формують основу для подальшої формалізації міжсистемних впливів і аналізу режимів функціонування.

Загальний стан платформи буде  $X = f(X_1, X_2, X_3, X_4)$ ; Така форма подання дозволяє розглядати АМП як систему зі складною структурою взаємодії станів. Кожна підсистема формує власний вектор стану, а їх сукупність утворює багатовимірний простір станів. Динаміка системи може бути описана рівнянням:

$\dot{X} = AX + BU + W$ , де  $A$  – матриця міжсистемних впливів,  $B$  – матриця керуючих дій,  $U$  – вектор управління,  $W$  – вектор зовнішніх збурень, зумовлених невизначеністю середовища, рис. 1.

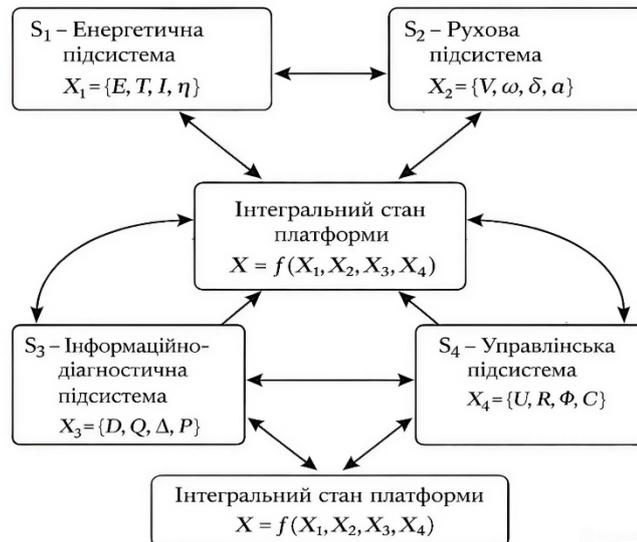


Рис. 1. Базова системна модель АМП

Між підсистемами АМП існує двосторонній причинно-наслідковий зв'язок, що формує єдину динамічну систему взаємних впливів.

Вплив  $S_1 \rightarrow S_2$  проявляється через енергетичні обмеження, які визначають доступну тягу, маневреність і тривалість виконання місії. У формалізованому вигляді цей зв'язок може бути поданий як залежність  $X_2 = g(X_1)$ , що відображає визначальний вплив енергетичного стану на можливості системи керування рухом.

Зворотний вплив  $S_2 \rightarrow S_1$  обумовлений інтенсивністю руху платформи, яка безпосередньо впливає на швидкість розряду джерел енергії та теплове навантаження енергетичної системи. Вплив  $S_3 \rightarrow S_4$  визначається якістю інформаційних даних: рівень достовірності, повноти та точності вимірювань безпосередньо впливає на точність керування та ймовірність помилок у процесі прийняття рішень.

Система управління  $S_4 \rightarrow S_1-S_3$  здійснює інтегральний вплив на всі підсистеми, оскільки алгоритми керування формують режими функціонування, коригують енергоспоживання та оптимізують навігаційні процеси.

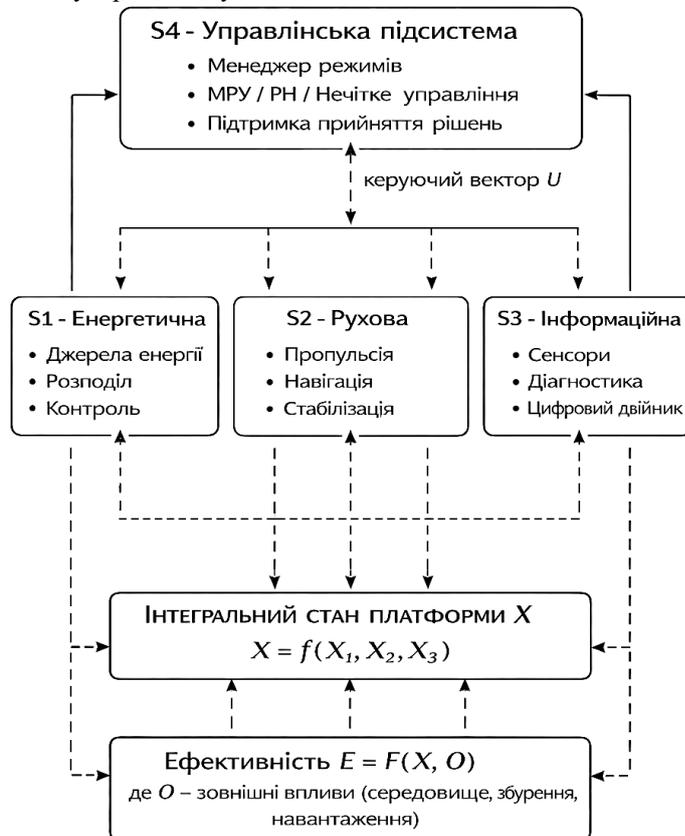
Для опису інтегральної поведінки АМП вводиться сукупність міжсистемних режимів стану, де кожен із зазначених режимів може бути формалізований як область допустимих значень вектору стану  $X$  у просторі параметрів. Перехід між режимами визначається граничними умовами, що задаються обмеженнями енергетичного ресурсу, рівнем похибки вимірювань, а також допустимими значеннями динамічних навантажень. Таким чином, множина режимів формує фазовий портрет функціонування АМП. Ефективність можна подати як:  $E = F(X_1, X_2, X_3, X_4, \Omega)$ , де  $\Omega$  – середовищна невизначеність. Міжсистемні режими стану АМП представлені в табл. 1.

**Міжсистемні режими стану автономної платформи**

| Режим стану          | Характеристика стану  | Основні прояви   | Наслідки для функціонування                                     |
|----------------------|---|--|---|
| Робочий стан         | Штатне функціонування всіх підсистем без критичних обмежень         | Номінальні параметри енергії, навігації та керування                       | Виконання місії відповідно до плану                             |
| Енергообмежений стан | Зниження доступних енергетичних ресурсів                            | Обмеження швидкості, маневреності, вимкнення другорядних функцій           | Зменшення функціональних можливостей, корекція місії            |
| Режим деградації     | Поступове погіршення технічних або інформаційних характеристик      | Зростання похибок, нестабільність сенсорних даних, накопичення ризику      | Підвищена ймовірність переходу в аварійний стан                 |
| Аварійний режим      | Критичні відхилення параметрів, що загрожують безпеці               | Втрата керованості, критичний рівень енергії, відмова вузлів               | Необхідність негайного втручання або переходу в безпечний режим |
| Оптимальний режим    | Узгоджене функціонування підсистем із мінімізацією витрат і ризиків | Збалансоване енергоспоживання, стабільна траєкторія, низький рівень ризику | Максимальна ефективність виконання місії                        |

Для формалізації процесів управління АМП доцільно представити її у вигляді багаторівневої функціональної структури, що включає енергетичну, рухову, інформаційну та управлінську підсистеми. Кожна з підсистем формує власний локальний стан  $X_i$ , а їх сукупна взаємодія визначає інтегральний стан платформи  $X = f(X_1, X_2, X_3)$ . Управлінська підсистема (S4) генерує керуючий вектор  $U$ , який адаптивно перерозподіляє ресурси між підсистемами залежно від поточних умов експлуатації та зовнішніх впливів, рис. 2.

Подана структурна схема демонструє ієрархічну модель керування з урахуванням зворотних зв'язків між підсистемами та інтегральним показником ефективності  $E = F(X, O)$ , де  $O$  – множина зовнішніх впливів (умови середовища, збурення, навантаження). Такий підхід дозволяє реалізувати адаптивне управління, в якому рішення приймаються не ізольовано для окремих модулів, а з урахуванням їх системної взаємодії, що створює основу для побудови цифрового двійника платформи та подальшого впровадження алгоритмів оптимізації й прогнозування технічного стану в реальному часі.



**Рис. 2. Концептуальна модель функціональної взаємодії підсистем АМП**

## Характер впливу функціональних систем АМП

| Система-джерело             | Система-одержувач           | Характер впливу              | Керуючий параметр впливу             | Наслідок для ефективності        |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| S <sub>1</sub> Енергетична  | S <sub>2</sub> Рухова       | Обмеження потужності         | Запас енергії $E$ , струм $I$        | Зниження швидкості, маневреності |
| S <sub>2</sub> Рухова       | S <sub>1</sub> Енергетична  | Динамічне навантаження       | Режим руху, прискорення $a$          | Прискорена деградація джерела    |
| S <sub>3</sub> Інформаційна | S <sub>4</sub> Управлінська | Якість інформації            | Похибка $\Delta$ , достовірність $Q$ | Точність прийняття рішень        |
| S <sub>4</sub> Управлінська | S <sub>2</sub> Рухова       | Формування режимів           | Керуючий сигнал $U$                  | Оптимізація траєкторії           |
| S <sub>4</sub> Управлінська | S <sub>1</sub> Енергетична  | Розподіл ресурсів            | Стратегія споживання                 | Подовження автономності          |
| S <sub>2</sub> Рухова       | S <sub>3</sub> Інформаційна | Генерація динамічних збурень | Вібрації, швидкість $V$              | Погіршення точності вимірювань   |
| S <sub>1</sub> Енергетична  | S <sub>3</sub> Інформаційна | Якість живлення              | Напруга, температурний режим         | Стабільність сенсорів            |
| S <sub>3</sub> Інформаційна | S <sub>1</sub> Енергетична  | Інформація про стан          | Діагностичні дані                    | Адаптація режиму живлення        |
| S <sub>4</sub> Управлінська | S <sub>3</sub> Інформаційна | Запит даних                  | Частота оновлення                    | Навантаження на систему обробки  |

Представлена структура взаємодій демонструє наявність двосторонніх та каскадних впливів між функціональними підсистемами. Найбільш критичними є взаємодії енергетичної та рухової систем, що формують первинний контур фізичної динаміки, а також інформаційної та управлінської систем, які забезпечують адаптивність та корекцію режимів функціонування. Сукупність зазначених зв'язків обумовлює необхідність подальшого формального аналізу у вигляді матриці взаємодії

$$\begin{array}{cccc}
 & S_1 & S_2 & S_3 & S_4 \\
 S_1 & - & \pm & + & + \\
 S_2 & \pm & - & - & + \\
 S_3 & + & + & - & + \\
 S_4 & + & + & + & -
 \end{array} \quad (1)$$

де: «+» – позитивний регулюючий вплив, «-» – потенційно дестабілізуючий вплив, «±» – двосторонній взаємний вплив.

Аналіз матриці міжсистемних впливів показує, що АМП функціонує як багатозв'язна система, в якій зміна стану однієї підсистеми викликає каскадні зміни в інших. Найбільш критичними є взаємодії між енергетичною та руховою системами, а також між інформаційною та управлінською підсистемами, що безпосередньо впливають на інтегральну ефективність експлуатації.

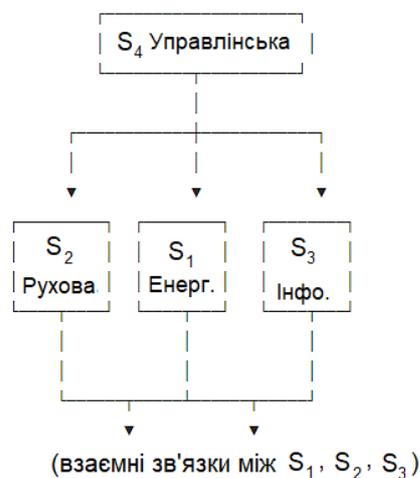


Рис. 3. Структура взаємодії підсистем

Взаємодія підсистем АМП має циклічний і взаємозалежний характер, у межах якого енергетичні, динамічні, інформаційні та процеси керування формують замкнений контур впливами. Такі зв'язки відображають причинно-наслідкову структуру функціонування платформи та визначають узгодженість її режимів роботи.

Основні міжсистемні взаємозв'язки можуть бути подані таким чином:

- $S_1 \leftrightarrow S_2$  (енергія  $\leftrightarrow$  навантаження);
- $S_2 \leftrightarrow S_3$  (рух  $\leftrightarrow$  точність роботи сенсорів);
- $S_3 \rightarrow S_4$  (дані  $\rightarrow$  управлінські рішення);
- $S_4 \rightarrow S_2$  (керування рухом);
- $S_4 \rightarrow S_1$  (керування енергоспоживанням);
- $S_1 \rightarrow S_3$  (стабільність живлення системи датчиків).

Граф взаємодій функціональних систем АМП має орієнтований характер та характеризується наявністю зворотних зв'язків між енергетичною та руховою підсистемами, а також домінуючим регулюючим впливом управлінської системи на інші підсистеми. Інформаційна система виконує роль проміжної ланки, що забезпечує передачу станів до алгоритмічного контуру управління, рис. 3.

Характер міжсистемних взаємодій можна описати таким чином. Система  $S_1$  має позитивний вплив на системи  $S_3$  та  $S_4$ , тоді як її взаємодія із системою  $S_2$  є змішаною та поєднує як підсилювальні, так і обмежувальні ефекти. Система  $S_2$  демонструє позитивний зв'язок із системою  $S_4$ , змішану взаємодію із системою  $S_1$  та негативний вплив на систему  $S_3$ . Система  $S_3$  виступає стабілізуючим підсилювачем: усі її міжсистемні зв'язки є позитивними, за винятком автозв'язку. Система  $S_4$  характеризується універсальним позитивним впливом і має позитивні зв'язки з усіма іншими системами, окрім автозв'язку.

Формальна модель зваженого графа.

Граф:  $Gw = (V, E, W)$ , де:  $V = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$ ,  $E = \{(S_i, S_j)\}$ ,  $W = \{a_{ij}\}$  – ваги ребер;

Нехай коефіцієнти впливу нормовані: 0 - відсутній вплив, 0.2 – слабкий, 0.5 – середній, 0.8 – сильний, 1.0 – домінуючий.

$$A = \begin{pmatrix} 0.0 & 0.8 & 0.4 & 0.2 \\ 0.7 & 0.0 & 0.5 & 0.3 \\ 0.9 & 0.7 & 0.0 & 0.6 \\ 0.9 & 0.7 & 0.6 & 0.0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Елемент матриці  $a_{ij}$  відображає нормований коефіцієнт впливу системи  $S_i$  на систему  $S_j$ . Нульові діагональні елементи відповідають відсутності самовпливу. Величини коефіцієнтів визначаються на основі експертної оцінки або результатів імітаційного моделювання.

Таблиця 2

**Інтерпретація ваг**

| Вплив          | Значення   | Фізичний зміст                              |
|----------------|------------|---|
| $a_{12} = 0.8$ | сильний    | енергетичні обмеження визначають рух        |
| $a_{21} = 0.7$ | сильний    | навантаження впливає на деградацію          |
| $a_{34} = 0.9$ | домінуючий | якість даних критично впливає на управління |
| $a_{41} = 0.9$ | домінуючий | алгоритм визначає розподіл енергії          |
| $a_{42} = 0.7$ | сильний    | управління визначає динаміку                |
| $a_{43} = 0.6$ | середній   | запити до інформаційної системи             |

Представлена інтерпретація вагових коефіцієнтів дозволяє кількісно оцінити інтенсивність міжсистемних впливів та перейти від якісного опису структури взаємодій до формального аналізу зваженого графа. Високі значення коефіцієнтів  $a_{34}$  та  $a_{41}$  свідчать про формування домінуючого інформаційно-управлінського контуру, який визначає адаптивність функціонування автономної платформи. Значні значення  $a_{12}$  та  $a_{21}$  підтверджують критичну роль енергетично-динамічної взаємодії у забезпеченні стабільності режимів руху.

На рисунку 4 подано зважений орієнтований граф, у якому вершини відповідають функціональним системам  $S_1 - S_4$ , а дуги відображають напрямок та інтенсивність міжсистемного впливу. Вагові коефіцієнти  $a_{ij}$  характеризують нормовану силу впливу системи  $S_i$  на систему  $S_j$ .

Аналіз структури графа показує наявність замкнених контурів взаємодії, зокрема:

- енергетично-динамічного контуру  $S_1 \leftrightarrow S_2$ ;
- інформаційно-управлінського контуру  $S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow S_1$ ;
- адаптивного циклу  $S_3 \rightarrow S_4 \rightarrow S_2$ .

Домінуюче положення системи  $S_4$  підтверджується найбільшою сумою вихідних ваг, що дозволяє розглядати її як центр структурної керованості АМП.

Сумарний вихідний вплив кожної системи визначається як сума вагових коефіцієнтів її впливу на інші системи. Відповідний показник обчислюється за виразом

$$C_{out}(S_i) = \sum_{j=1}^4 a_{ij} \quad (3)$$

де  $C_{out}(S_i)$  – сумарний вихідний вплив системи  $S_i$ , що характеризує її структурну активність у межах зваженого графа взаємодій.

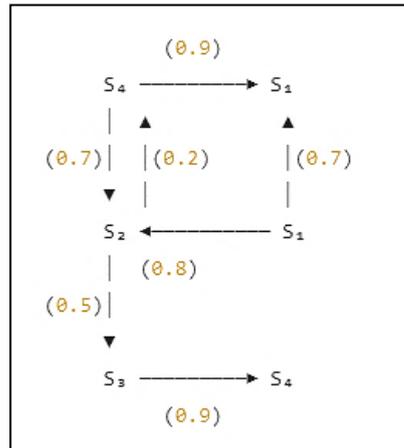


Рис. 4. Зважений орієнтований граф міжсистемних взаємодій АМП

На основі матриці взаємодій отримано такі значення сумарних вихідних впливів: для  $S_1$ :  $0.8 + 0.4 + 0.2 = 1.4$ , для  $S_2$ :  $0.7 + 0.5 + 0.3 = 1.5$ , для  $S_3$ :  $0.2 + 0.4 + 0.9 = 1.5$ , для  $S_4$ :  $0.9 + 0.7 + 0.6 = 2.2$ .

#### Результати та обговорення

Отримані результати свідчать, що система  $S_4$  характеризується найбільшим рівнем вихідного впливу на інші підсистеми, що підтверджує її домінуючу роль у загальній структурі взаємодій АМП.

Аналіз зваженого орієнтованого графа показує, що управлінська система має найбільшу структурну вагу впливу на інші підсистеми, що підтверджує її домінуючу роль у забезпеченні інтегральної ефективності експлуатації АМП. Найбільш критичними взаємодіями є контури  $S_4 \rightarrow S_1$  та  $S_3 \rightarrow S_4$ , які формують замкнений цикл адаптивного управління.

Отримані результати підтверджують, що управлінська система виконує функцію інтегруючого та стабілізуючого центру АМП. Саме через неї реалізується замкнений цикл адаптивного управління, який забезпечує підтримання інтегральної ефективності в умовах змінної середовищної невизначеності  $\Omega$ . Таким чином, запропонована модель створює методологічну основу для подальшого аналізу стійкості, керованості та оптимізації режимів експлуатації.

Проведений аналіз зваженої матриці взаємодій та відповідного графа дозволяє кількісно оцінити структурну роль кожної підсистеми та визначити домінуючі канали впливу в межах АМП.

#### Висновки з даного дослідження

##### і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Запропоновано системну модель автономної морської платформи, що базується на функціональній декомпозиції та формалізації взаємодій між чотирма базовими підсистемами: енергетичною, руховою, інформаційно-діагностичною та управлінською. Сформовано узагальнений простір станів платформи, що дозволяє розглядати її як багатовимірну динамічну систему з причинно-наслідковими міжсистемними зв'язками. Розроблено матричну модель міжсистемних впливів і побудовано зважений орієнтований граф взаємодій, що забезпечує кількісне оцінювання структурної ролі кожної підсистеми. Введено показник сумарного вихідного впливу, який дозволяє визначити структурну активність підсистем та їх внесок у формування інтегральної ефективності. Встановлено домінуючу роль управлінської підсистеми як центру структурної керованості, що формує замкнений адаптивний контур управління в умовах середовищної невизначеності.

#### Література

1. Dong Y., Din M. U., Lagala F., Kuang H., Sun J., Yang S., Hussain I., He S. Drone carrier: An integrated unmanned surface vehicle for autonomous inspection and intervention in GNSS-denied maritime environment // Journal of Ocean Engineering and Science. – 2026. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2026.02.002>.
2. Aydin M., Sezer S. I., Akyuz E., Gardoni P. Improved Z-number based Bayesian network modelling to predict cyber-attack risk for maritime autonomous surface ship (MASS) // Applied Soft Computing. – 2025. – Vol. 180. – Article 113416. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113416>.
3. Chen C., Duan C., Wang Y., Zhang G. An intelligent approach to maritime autonomous surface ship performance evaluation // Expert Systems With Applications. – 2026. – Vol. 313. – Article 131631. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.131631>.
4. Li Z., Mao Z., Zhang D., Fan S., Lyu W., Zhou J., Yang H. Mental workload-performance relationships in maritime autonomous surface ship remote control scenarios // Ocean Engineering. – 2025. – Vol. 339. – Article 122094. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122094>.
5. Guo D., Yin Y., Jing Q., Shao Z., Xu H. A LiDAR intensity-enhanced 3D object detection method for maritime autonomous navigation // Ocean Engineering. – 2026. – Vol. 343. – Article 123586. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2026.123586>.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123586>.

6. Belabyad M., Pyne R., Paraskevadakis D., Chang C., Kontovas C. Technology evolution in maritime autonomous systems: A patent-based analysis // *Ocean & Coastal Management*. – 2025. – Vol. 267. – Article 107744. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107744>.

7. Yu H., Wu D., Li G., Lian T., Li Y., Li F. Collision avoidance for maritime autonomous surface ship in busy waterways based on the improved deep reinforcement learning and K-means clustering // *Ocean Engineering*. – 2026. – Vol. 343. – Article 123396. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123396>.

8. Othman M. K., Mohd Sabri N. S. A., Abdul Rahman N. S. F., Osnin N. A. Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia // *Case Studies on Transport Policy*. – 2025. – Vol. 22. – Article 101567. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567>.

9. Wang S., Zhang Y., Zhang X., Gao Z. A novel maritime autonomous navigation decision-making system: Modeling, integration, and real ship trial // *Expert Systems With Applications*. – 2023. – Vol. 222. – Article 119825. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119825>.

10. Min W., Muthanna M. S. A., Ibrahim M., Alkanhel R., Muthanna A., Laouid A. Privacy-preserving federated UAV data collection framework for autonomous path optimization in maritime operations // *Applied Soft Computing*. – 2025. – Vol. 173. – Article 112906. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112906>.

11. Yang L., Liu J., Zhou Q., Liu Z., Chen Y., Wang Y., Liu Y. Enabling autonomous navigation: Adaptive multi-source risk quantification in maritime transportation // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2025. – Vol. 261. – Article 111118. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111118>.

12. Булгаков М. П., Мельник О. М., Алексішин А. В., Мазур О. М., Онищенко О. А. Інтеграція ризик-аналізу в оцінювання енергоефективності суден при зміні швидкісних режимів // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – 2025. – № 1(30). – С. 59–68. – DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.059-068>.

13. Бурлаченко Д. А., Мельник О. М. Моделювання поведінки та імітація надзвичайних ситуацій для автономного судна з оцінкою стабільності траєкторії руху // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – 2025. – № 1 (30). – С. 195–208. – DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>.

14. Никитюк П. В., Мельник О. М. Створення інтегрованої моделі забезпечення експлуатаційної безпеки судна // *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. – 2025. – № 1 (30). – С. 209–221. – DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221>.

15. Никитюк П. В., Мельник О. М. Інтегрована модель оцінки та адаптивного управління експлуатаційною безпекою морського судна в умовах динамічного середовища // *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2025. – Вип. 50. – С. 235–246. – DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>.

## References

1. Dong Y., Din M. U., Lagala F., Kuang H., Sun J., Yang S., Hussain I., He S. Drone carrier: An integrated unmanned surface vehicle for autonomous inspection and intervention in GNSS-denied maritime environment // *Journal of Ocean Engineering and Science*. – 2026. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.joes.2026.02.002>.

2. Aydın M., Sezer S. I., Akyuz E., Gardoni P. Improved Z-number based Bayesian network modelling to predict cyber-attack risk for maritime autonomous surface ship (MASS) // *Applied Soft Computing*. – 2025. – Vol. 180. – Article 113416. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113416>.

3. Chen C., Duan C., Wang Y., Zhang G. An intelligent approach to maritime autonomous surface ship performance evaluation // *Expert Systems With Applications*. – 2026. – Vol. 313. – Article 131631. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2026.131631>.

4. Li Z., Mao Z., Zhang D., Fan S., Lyu W., Zhou J., Yang H. Mental workload-performance relationships in maritime autonomous surface ship remote control scenarios // *Ocean Engineering*. – 2025. – Vol. 339. – Article 122094. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.122094>.

5. Guo H., Yin Y., Jing Q., Shao Z., Xu H. A LiDAR intensity-enhanced 3D object detection method for maritime autonomous navigation // *Ocean Engineering*. – 2026. – Vol. 343. – Article 123586. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123586>.

6. Belabyad M., Pyne R., Paraskevadakis D., Chang C., Kontovas C. Technology evolution in maritime autonomous systems: A patent-based analysis // *Ocean & Coastal Management*. – 2025. – Vol. 267. – Article 107744. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107744>.

7. Yu H., Wu D., Li G., Lian T., Li Y., Li F. Collision avoidance for maritime autonomous surface ship in busy waterways based on the improved deep reinforcement learning and K-means clustering // *Ocean Engineering*. – 2026. – Vol. 343. – Article 123396. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123396>.

8. Othman M. K., Mohd Sabri N. S. A., Abdul Rahman N. S. F., Osnin N. A. Port operators' perceptions and acceptance of maritime autonomous surface ships (MASS) operations: Insights from Malaysia // *Case Studies on Transport Policy*. – 2025. – Vol. 22. – Article 101567. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101567>.

9. Wang S., Zhang Y., Zhang X., Gao Z. A novel maritime autonomous navigation decision-making system: Modeling, integration, and real ship trial // *Expert Systems With Applications*. – 2023. – Vol. 222. – Article 119825. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119825>.

10. Min W., Muthanna M. S. A., Ibrahim M., Alkanhel R., Muthanna A., Laouid A. Privacy-preserving federated UAV data collection framework for autonomous path optimization in maritime operations // *Applied Soft Computing*. – 2025. – Vol. 173. – Article 112906. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.112906>.

11. Yang L., Liu J., Zhou Q., Liu Z., Chen Y., Wang Y., Liu Y. Enabling autonomous navigation: Adaptive multi-source risk quantification in maritime transportation // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2025. – Vol. 261. – Article 111118. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111118>.

12. Bulgakov M. P., Melnyk O. M., Aleksishin A. V., Mazur O. M., Onyshchenko O. A. Integration of risk analysis into ship energy efficiency assessment under speed regime changes // *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*. – 2025. – No. 1(30). – P. 59–68. – DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.059-068>.

13. Burlachenko D. A., Melnyk O. M. Modeling behavior and simulating emergencies for autonomous ship with trajectory stability assessment // *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*. – 2025. – No. 1(30). – P. 195–208. – DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.195-208>.

14. Nykytyuk P. V., Melnyk O. M. Development of an integrated model for ensuring ship operational safety // *Scientific Bulletin of Kherson State Maritime Academy*. – 2025. – No. 1(30). – P. 209–221. – DOI: <https://doi.org/10.33815/2313-4763.2025.1.30.209-221>.

15. Nykytyuk P. V., Melnyk O. M. Integrated model for evaluation and adaptive management of ship operational safety in dynamic environment // *Bulletin of Pryazovskiy State Technical University. Series: Technical Sciences*. – 2025. – Issue 50. – P. 235–246. – DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336409>.