

## ІНТЕГРОВАНІЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ РИЗИКІВ ВИКОРИСТАННЯ РОТОРІВ ФЛЕТНЕРА НА МОРСЬКИХ СУДНАХ

У статті розглянуто питання оцінки ризиків використання роторів Флетнера на морських судах як елементів вітроасистованої пропульсії в умовах впровадження енергоефективних технологій у сучасному суднопластві. Обґрунтовано актуальність дослідження з огляду на необхідність зниження паливних витрат, скорочення викидів парникових газів та забезпечення безпечної інтеграції альтернативних пропульсивних систем у судові енергетичні комплекси. Проведено аналіз сучасних наукових підходів до оцінки ефективності та безпечності роторів Флетнера, встановлено, що наявні дослідження переважно зосереджені на аеродинамічних і енергетичних характеристиках системи, тоді як питання комплексної оцінки ризиків залишаються недостатньо розробленими.

Запропоновано інтегрований підхід до оцінки ризиків, що поєднує процедури ідентифікації небезпек, принципи FSA, елементи HAZID/HAZOP та кількісне визначення інтегрального показника ризику. У межах дослідження виконано систематизацію ризиків за основними групами: технічні, аеродинамічні, навігаційні, експлуатаційні, пов'язані з людським елементом, а також регуляторні й екологічні. Встановлено, що найбільший вплив на загальний рівень ризику мають аеродинамічні та навігаційні фактори, які визначають остійність судна, керованість і стабільність функціонування системи за різних режимів експлуатації.

Розроблено структуру інтегрального показника ризику, яка враховує ймовірність виникнення небезпечних подій, тяжкість їх наслідків та вагову значущість окремих груп ризиків, що дозволяє формалізувати оцінку безпечності використання роторів Флетнера для різних типів суден і сценаріїв експлуатації. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої методики на етапах проєктування, технічної інтеграції, експлуатаційного контролю та підготовки рекомендацій щодо мінімізації ризиків при впровадженні вітроасистованих пропульсивних технологій у морському транспорті.

**Ключові слова:** ротори Флетнера, вітроасистована пропульсія (WASP), морське судно, оцінка ризиків, інтегральний показник ризику, безпека суднопластва, енергоефективність.

**Постановка проблеми.** В умовах сучасної трансформації морського транспорту, зумовленої посиленням міжнародних екологічних вимог, зростанням вартості традиційних видів палива та необхідністю зниження викидів парникових газів, особливої актуальності набуває впровадження енергоефективних технологій, здатних забезпечити часткове заміщення традиційних пропульсивних систем. Одним із найбільш перспективних напрямів у цьому контексті є використання роторів Флетнера (парусів Флетнера), як вітроасистованих пропульсивних установок, принцип дії яких ґрунтується на ефекті Магнуса та дозволяє перетворювати енергію вітру на додаткову рушійну силу судна. Практичний досвід експлуатації суден, оснащених такими системами, підтверджує їх потенціал щодо зниження витрат палива, підвищення енергетичної ефективності та скорочення екологічного навантаження, однак одночасно виявляє низку технічних, навігаційних, експлуатаційних і організаційних факторів, які можуть істотно впливати на безпечність функціонування судна. Це обумовлює необхідність переходу від виключно енергетичної оцінки ефективності роторів Флетнера до системного аналізу ризиків, пов'язаних із їх інтеграцією у судові енергетичні та навігаційні системи.

Аналіз сучасних наукових досліджень свідчить, що переважна частина опублікованих праць присвячена аеродинамічним характеристикам обертючих циліндрів, моделюванню ефекту Магнуса, визначенню приросту тягової сили та оцінці економічної ефективності використання роторів Флетнера,

тоді як питання комплексного ризик-аналізу залишаються недостатньо розробленими. Існуючі підходи, як правило, орієнтовані або на локальний аналіз окремих відмов елементів системи, або на застосування загальних процедур морської безпеки без адаптації до специфіки WASP. Унаслідок цього відсутня уніфікована методична основа, яка дозволяла б одночасно враховувати аеродинамічні процеси, технічну надійність обладнання, вплив на остійність судна, зміну умов керованості та роль людського елемента в управлінні системою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних наукових і прикладних джерел, присвячених використанню роторів Флетнера, як засобу вітроасистованої пропульсії (WASP), свідчить про відсутність уніфікованого підходу до оцінки ризиків цієї технології. У науковій літературі переважають дослідження, орієнтовані на аеродинамічні, енергетичні та економічні елементи застосування роторів, тоді як питання комплексної оцінки ризиків розглядаються фрагментарно та здебільшого у межах суміжних методологій [1–2]. Це обумовлює необхідність узагальнення існуючих підходів та їх адаптації до специфіки вітроасистованих пропульсивних систем.

Теоретичні основи функціонування роторів Флетнера базуються на ефекті Магнуса, що детально досліджений у працях з аеродинаміки обертючих тіл [3 – 5]. У цих роботах основна увага приділяється визначенню підйомної сили, коефіцієнтів аеродинамічного опору та впливу параметрів потоку, зокрема числа Рейнольдса, на характеристики обтікання [4]. Використання чисельного моделювання (CFD) дозволяє досліджувати розподіл тиску навколо ротора, структуру вихрових утворень та нестійкі режими течії. У цьому контексті ризики розглядаються як наслідок аеродинамічної нестабільності, включаючи можливий зрив потоку, виникнення вихрових коливань і змінності підйомної сили залежно від режимів експлуатації [6, 7].

Суттєвим напрямом досліджень є застосування CFD-моделювання у поєднанні з аналізом невизначеностей, що забезпечує перехід до кількісної оцінки ризиків [4, 5]. Такий підхід дозволяє досліджувати вплив змінних параметрів, включаючи швидкість вітру, кут атаки та швидкість обертання ротора, на ефективність і стабільність роботи системи. У результаті визначаються діапазони експлуатаційних умов, у яких ризики є мінімальними або, навпаки, зростають.

Прикладні дослідження, присвячені використанню роторів Флетнера на морських судах, зосереджені на оцінці їх енергетичної ефективності та впливу на експлуатаційні показники судна [1 – 8]. Отримані результати свідчать, що ефективність таких систем значною мірою визначається зовнішніми умовами, зокрема швидкістю та напрямком вітру, а також режимом роботи ротора. Встановлено, що за несприятливих умов можливе не лише зниження ефективності, але й виникнення додаткового аеродинамічного опору, що негативно впливає на загальні характеристики руху судна. Це формує окрему групу експлуатаційних ризиків, пов'язаних із варіативністю зовнішнього середовища та складністю оптимального керування системою.

У контексті формалізованої оцінки ризиків широко застосовуються методології, рекомендовані міжнародними організаціями та класифікаційними товариствами [9 – 12]. Зокрема, метод Formal Safety Assessment (FSA), розроблений International Maritime Organization (ІМО), передбачає системний підхід до ідентифікації небезпек, аналізу ризиків та визначення заходів їх мінімізації. Даний підхід дозволяє враховувати як технічні, так і організаційні фактори, що впливають на безпеку експлуатації нових технологій у судноплаванні.

Важливу роль у практиці впровадження роторів Флетнера відіграють методи попередньої ідентифікації небезпек, такі як HAZID та HAZOP [9], які використовуються на етапах проектування та інтеграції систем у конструкцію судна. Ці підходи дають змогу систематизувати потенційні ризики, зокрема пов'язані з впливом на остійність судна, збільшенням вітрового навантаження, зміною умов оглядовості та можливими відмовами технічних компонентів. Незважаючи на широке застосування у практиці, результати таких оцінок рідко представлені у відкритих наукових джерелах, що ускладнює їх узагальнення та порівняльний аналіз.

Серед кількісних підходів до оцінки ризиків значного поширення набув метод аналізу видів і наслідків відмов (FMEA), який дозволяє оцінити критичність окремих елементів системи [10]. Для роторів Флетнера цей метод застосовується при аналізі можливих відмов, зокрема збоїв у роботі приводу, пошкодження підшипників, перевантаження конструкції та порушень у системах керування.

Використання такого підходу сприяє визначенню пріоритетних напрямів підвищення надійності системи та мінімізації ризиків її експлуатації.

Окрему групу становлять інтегровані підходи до оцінки, зокрема методи, що поєднують технічні, економічні та екологічні елементи функціонування системи [11, 12]. У межах таких підходів ризик розглядається як комплексна характеристика, що враховує не лише ймовірність і наслідки небажаних подій, а й їх вплив на ефективність використання технології. Це дозволяє більш повно оцінити доцільність впровадження роторів Флетнера в умовах сучасних вимог до енергоефективності та екологічної безпеки морського транспорту.

Узагальнення результатів аналізу літератури свідчить, що складність фізичних процесів, які визначають роботу роторів Флетнера, а також значна залежність від зовнішніх умов зумовлюють необхідність застосування комплексних підходів до оцінки ризиків. Поєднання аеродинамічних, механічних та експлуатаційних факторів формує високий рівень невизначеності, що обмежує ефективність використання окремих ізольованих методів аналізу. У зв'язку з цим найбільш обґрунтованим є застосування інтегрованих підходів, які поєднують якісні методи ідентифікації небезпек із кількісними інструментами аналізу, включаючи чисельне моделювання, аналіз відмов та багатокритеріальні методи оцінки. Такий підхід дозволяє забезпечити більш повне врахування специфіки функціонування роторів Флетнера та підвищити рівень обґрунтованості управлінських і технічних рішень щодо їх впровадження.

**Метою статті** є розроблення інтегрованого підходу до оцінки ризиків використання роторів Флетнера на морських суднах шляхом поєднання якісних процедур ідентифікації небезпек із кількісною оцінкою інтегрального рівня ризику, що забезпечує системне врахування технічних, аеродинамічних, експлуатаційних і організаційних факторів функціонування вітроасистованих пропульсивних систем.

Наукова новизна статті полягає у формуванні комплексної методики оцінки ризиків використання роторів Флетнера, яка базується на інтеграції принципів Formal Safety Assessment, процедур HAZID/HAZOP та кількісного інтегрального показника ризику з урахуванням вагових коефіцієнтів окремих груп небезпек. На відміну від існуючих підходів, запропонована методика дозволяє не лише виконувати ранжування ризиків за рівнем критичності, але й оцінювати їх сумарний вплив у межах єдиної ієрархічної моделі, адаптованої до специфіки функціонування роторних вітроенергетичних установок на суднах.

**Виклад основного матеріалу та основні результати дослідження.** Використання роторів Флетнера у сучасному судноплаванні супроводжується низкою технічних, експлуатаційних та економічних ризиків, які потребують детального аналізу в межах ризикології.

З урахуванням результатів аналізу літератури встановлено, що існуючі підходи до оцінки ризиків використання роторів Флетнера є фрагментарними та не забезпечують комплексного врахування специфіки функціонування вітроасистованих пропульсивних систем. Зокрема, окремі дослідження зосереджені на аеродинамічних елементах [3, 7], інші – на енергетичній ефективності [1, 2], тоді як методи оцінки ризиків розглядаються у межах загальних підходів до безпеки мореплавства [9 – 12]. У зв'язку з цим доцільним є формування інтегрованої методики, що поєднує якісні та кількісні інструменти аналізу.

Автор пропонує методика, яка базується на поєднанні підходу FSA із введенням інтегрального показника, що дозволяє врахувати як фізичні процеси, так і експлуатаційні особливості функціонування системи. Запропонована методика передбачає чотири послідовні етапи, узагальнено представлені на рис. 1.

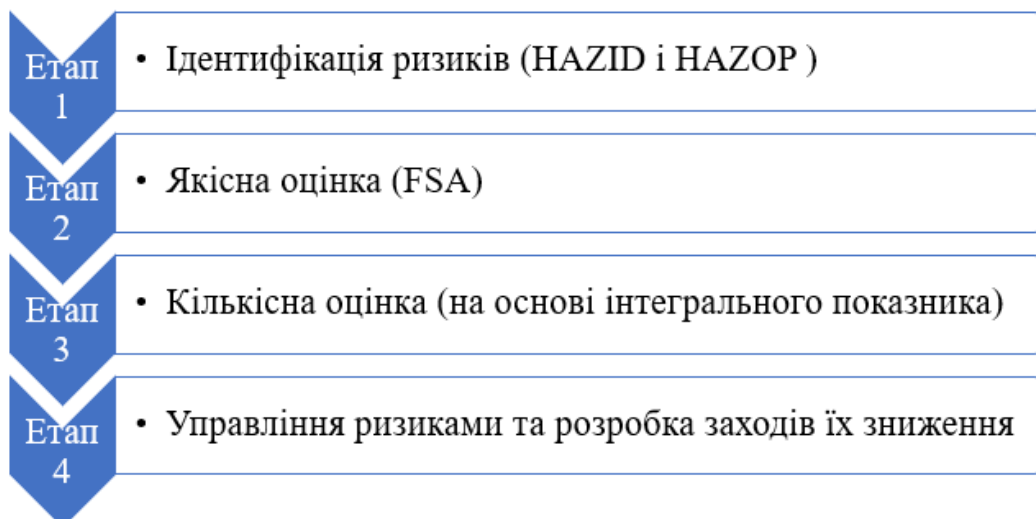


Рисунок 1 – Чотири етапи оцінки та управління ризиками при використанні роторів Флетнера  
Джерело: власні розробки авторів на основі [9]

На першому етапі здійснюється ідентифікація небезпек, пов'язаних із використанням роторів Флетнера, причому формування переліку ризиків ґрунтується на узагальненні результатів досліджень [1 – 8] та застосуванні процедур HAZID і HAZOP [9]. Такий підхід дозволяє системно охопити як потенційні відмови елементів установки, так і відхилення у режимах її експлуатації, що мають критичне значення для безпеки судноплавства. У результаті проведеної ідентифікації встановлено, що найбільш характерні небезпеки формуються під впливом взаємодії аеродинамічних процесів, технічного стану обладнання та умов експлуатації судна. Зокрема, зміна структури потоку навколо ротора може призводити до нестабільності підйомної сили або її різкого зниження внаслідок зриву потоку, що безпосередньо впливає на керованість судна, тоді як відмови приводу чи знос підшипникових вузлів знижують надійність роботи системи та можуть спричинити втрату тягового ефекту. Одночасно враховується вплив роторів на навігаційні характеристики судна, включаючи зміну остійності та обмеження оглядовості з ходового містка, що ускладнює прийняття рішень судноводієм у складних умовах плавання. Встановлено також, що ефективність та безпечність використання роторів значною мірою залежать від правильності вибору режимів їх роботи, оскільки неоптимальні параметри обертання можуть не лише знижувати енергетичний ефект, але й створювати додаткові навантаження на конструкцію судна. Окрему групу становлять ризики, зумовлені людським елементом, які проявляються через помилки екіпажу під час керування системою, недостатній рівень підготовки або неправильну інтерпретацію інформації від автоматизованих систем, що в сукупності визначає необхідність комплексного врахування як технічних, так і організаційних чинників на етапі ідентифікації небезпек.

Узагальнення результатів ідентифікації небезпек дозволяє перейти до їх систематизації за природою виникнення, що забезпечує впорядковане подання ризиків і створює основу для подальшого аналізу. Встановлено, що ризики, пов'язані з використанням роторів Флетнера, доцільно розглядати як багатокомпонентну систему, у якій технічні відмови, експлуатаційні умови та вплив зовнішнього середовища формують взаємопов'язані сценарії розвитку небезпечних подій (табл. 1).

Таблиця 1 – Систематизація ризиків при використанні роторів Флетнера

Група ризику	Характеристики
<i>Технічна група</i>	Процеси деградації та відмов елементів установки, зокрема руйнування конструкції ротора, виникнення вібрацій і втоми матеріалу, а також відмови систем керування, що безпосередньо впливають на працездатність і надійність комплексу
<i>Експлуатаційні ризики</i>	Практичне використання системи та пов'язані з некоректним вибором режимів роботи, ускладненням маневрування судна і особливостями взаємодії роторів з автоматизованими навігаційними системами
<i>Аеродинамічні та навігаційні ризики</i>	Виникають унаслідок дії ефекту Магнуса, зміщення центра прикладення сил і змін характеристик остійності, що може призводити до нестійкої поведінки судна в умовах інтенсивного вітрового навантаження
<i>Людський елемент</i>	Проявляються через помилки оператора, недостатній рівень підготовки екіпажу та неточну інтерпретацію даних, що надходять від систем моніторингу, і в умовах високого рівня автоматизації можуть істотно підвищувати загальний рівень небезпеки
<i>Регуляторні та екологічні ризики</i>	Зумовлені відсутністю усталених нормативних вимог, обмеженнями сертифікації нових технологій та потенційним впливом на безпеку інших учасників судноплавства

*Джерело: власні розробки авторів*

Така класифікація дозволяє розглядати ризики не ізольовано, а як елементи єдиної системи, що відображає реальні умови експлуатації судна з роторними установками.

Наступним кроком є *другий етап* методики, який передбачає якісну оцінку ідентифікованих ризиків із використанням принципів, закладених у підході FSA [9]. На цьому етапі для кожного з визначених ризиків встановлюється його відносна значущість шляхом експертного визначення ймовірності виникнення та тяжкості можливих наслідків, що дозволяє врахувати як технічні характеристики системи, так і умови її експлуатації. Застосування такого підходу забезпечує можливість виконання попереднього ранжування ризиків, у межах якого виокремлюються найбільш критичні сценарії розвитку подій, що мають найбільший вплив на безпеку судна та ефективність використання роторів Флетнера.

Приклад результату якісної оцінки можливо представити у вигляді таблиці ранжування (табл. 2), що дозволяє візуалізувати розподіл ризиків за рівнем їх значущості та визначити пріоритетні напрями подальшого аналізу.

Таблиця 2 – Приклад результату якісної оцінки за принципами FSA

№	Ризик	Група	Ймовірність (P)*	Наслідки (C)*	Рівень ризику (R = P×C)	Пріоритет
1	Вплив на остійність судна	Аеродинамічні/навігаційні	4	4	16	Високий
2	Погіршення керованості	Навігаційні	5	3	15	Високий
3	Відмова приводу ротора	Технічні	4	3	12	Високий
4	Зміщення центра сил	Аеродинамічні	3	4	12	Високий
5	Вібрації та втома матеріалу	Технічні	5	2	10	Середній
6	Некоректні режими роботи	Експлуатаційні	5	2	10	Середній
7	Помилки оператора	Людський елемент	3	3	9	Середній
8	Знос підшипників	Технічні	4	2	8	Середній
9	Зрив потоку	Аеродинамічні	2	3	6	Низький
10	Неправильна інтерпретація даних	Людський елемент	2	2	4	Низький

Джерело: власні розробки авторів на основі [9]

\*Шкала 1–5 була обрана як базова. Така шкала відповідає поширеним підходам у морській ризикології та дозволяє узгодити результати з практикою FSA IMO.

Третій етап передбачає кількісну оцінку ризиків на основі інтегрального показника, що формується як зважена сума добутків ймовірності виникнення небезпечних подій та тяжкості їх наслідків. Такий підхід дозволяє перейти від якісного ранжування до формалізованої оцінки рівня ризику та забезпечує можливість порівняння різних сценаріїв експлуатації роторів Флетнера. Інтегральний показник має враховувати не лише ймовірність і наслідки, але й різну «вагу» груп ризиків, що є принципово важливим для систем із новими технологіями, зокрема роторів Флетнера. У загальному вигляді інтегральний ризик судна з роторними установками можна подати як зважену суму окремих ризиків:

$$R_{int} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \cdot C_i \quad (1)$$

де  $P_i$  – ймовірність виникнення  $i$ -го ризику,

$C_i$  – тяжкість наслідків,

$w_i$  – ваговий коефіцієнт, що відображає значущість ризику або групи ризиків,

$n$  – загальна кількість ідентифікованих небезпек.

Для зручності порівняння різних суден або сценаріїв експлуатації показник можна нормувати:

$$R_{norm} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot P_{max} \cdot C_{max}} \quad (2)$$

Це дозволяє отримати безрозмірну величину в інтервалі від 0 до 1, що зручно для порівняння різних суден або конфігурацій роторів.

З урахуванням раніше запропонованої класифікації доцільно агрегувати ризики за групами, що дозволяє перейти до ієрархічної моделі:

$$R_{int} = \sum_{j=1}^m W_j \cdot \left( \sum_{i=1}^{k_j} P_{ij} \cdot C_{ij} \right) \quad (3)$$

де  $W_j$  – ваговий коефіцієнт  $j$ -ї групи ризиків (технічні, аеродинамічні, експлуатаційні, пов'язані з людським елементом тощо),

$k_j$  – кількість ризиків у групі.

Практично це означає, що, наприклад, навігаційні та аеродинамічні ризики можуть мати більшу вагу порівняно з експлуатаційними, оскільки вони безпосередньо впливають на безпеку судна.

Для застосування моделі необхідно задати шкали:

- ймовірність  $P$  у межах 1–5 (від рідкісних до частих подій);
- наслідки  $C$  у межах 1–5 (від незначних до катастрофічних);
- вагові коефіцієнти  $w_i$  або  $W_j$ , які можуть визначатися експертно або на основі аналізу літератури.

На основі цього можна ввести інтерпретацію інтегрального показника:

- $R_{norm} < 0,2$  – низький рівень ризику;
- $0,2 - 0,5$  – прийнятний;
- $0,5 - 0,75$  – підвищений;
- $> 0,75$  – критичний.

Четвертий етап оцінки та управління ризиками при використанні роторів Флетнера передбачає системний підхід до зниження небезпеки та підвищення безпечності експлуатації судна. На цьому етапі інтегральний показник ризику виступає основою для прийняття управлінських рішень і визначення пріоритетів заходів щодо його мінімізації. Для кожної групи ризику визначається сумарний внесок у загальний інтегральний показник, що дозволяє відобразити реальний вплив кожного типу ризиків на безпеку судна. Далі доцільно провести побудову діаграми Парето (табл. 3, рис. 2), яка наочно продемонструє, які групи ризиків формують основний внесок у загальний рівень небезпеки.

Таблиця 3 – Таблиця для побудови діаграми Парето

Група ризиків	Інтегральний внесок (Rгрупи)	Кумулятивний %
Аеродинамічні/навігаційні	35	35
Технічні	30	65
Експлуатаційні	20	85
Людський елемент	10	95
Регуляторні/екологічні	5	100

Джерело: власні розробки авторів

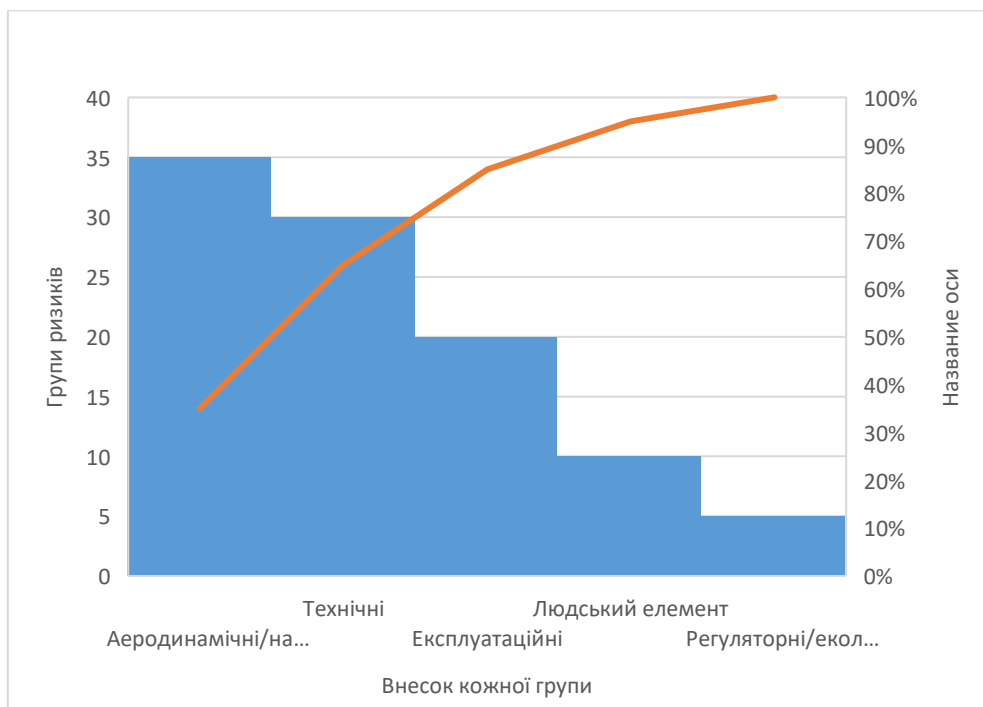


Рисунок 2 – Діаграма Парето  
Джерело: власні розробки авторів

На цій діаграмі відсотковий внесок кожної групи відкладається на осі Y, а групи ризиків – на осі X, при цьому кумулятивна крива дозволяє виділити пріоритетні фактори, що формують найбільший рівень ризику, відповідно до принципу Парето. Паралельно проводиться аналіз чутливості, що передбачає оцінку впливу зміни окремих параметрів ймовірності, тяжкості наслідків та вагових коефіцієнтів на інтегральний показник. Це дозволяє визначити, які ризики є найбільш критичними та потребують першочергової уваги, а також перевірити стабільність результатів оцінки при варіюванні умов експлуатації.

На основі отриманих результатів розробляються заходи зниження ризику. Технічні заходи включають вдосконалення приводу та підшипників ротора, контроль вібрацій та зміцнення конструкції, експлуатаційні – оптимізацію режимів роботи та інтеграцію системи з навігаційними засобами судна, організаційні та заходи щодо людського елемента – підвищення кваліфікації екіпажу, створення навчальних тренажерів та стандартизованих інструкцій щодо моніторингу та контролю, а регуляторні та екологічні – забезпечення сертифікації систем і відповідності міжнародним нормам безпеки та екології.

Після впровадження заходів проводиться повторний розрахунок інтегрального показника ризику та, за необхідності, коригування вагових коефіцієнтів і додаткове моделювання для уточнення пріоритетів. Такий комплексний підхід дозволяє не лише знизити рівень небезпеки при використанні роторних установок, але й забезпечити ефективну інтеграцію роторів Флетнера у судові системи, враховуючи всі технічні, експлуатаційні та організаційні фактори, що визначають безпечність і ефективність їх функціонування.

**Висновок.** У результаті проведеного дослідження встановлено, що використання роторів Флетнера як елементів WASP, супроводжується формуванням багатофакторного комплексу ризиків, структура якого визначається одночасним впливом аеродинамічних процесів, технічного стану обладнання, умов експлуатації судна, навігаційних особливостей та людського елемента. Аналіз сучасних наукових джерел засвідчив, що наявні підходи до оцінки таких ризиків переважно орієнтовані на окремі аспекти функціонування роторних систем і не забезпечують цілісного врахування взаємозв'язків між фізичними процесами, технічними відмовами та експлуатаційними наслідками, що обмежує можливість їх практичного використання для прийняття комплексних інженерних рішень.

У межах роботи обґрунтовано доцільність застосування інтегрованої методики оцінки ризиків, побудованої на поєднанні процедур ідентифікації небезпек, принципів FSA та кількісного інтегрального показника ризику. Запропонований підхід дозволяє систематизувати потенційні небезпеки за функціональними групами, визначати їх відносну значущість, виконувати ранжування за рівнем критичності та переходити від якісного аналізу до формалізованого кількісного оцінювання. Встановлено, що найбільший вплив на загальний рівень ризику мають аеродинамічні та навігаційні фактори, оскільки саме вони безпосередньо визначають зміну остійності, керованості судна та стабільності дії підйомної сили, сформованої внаслідок ефекту Магнуса.

Розроблена структура інтегрального показника ризику забезпечує можливість врахування не лише ймовірності виникнення небезпечних подій і тяжкості їх наслідків, але й диференційованої вагомості окремих груп ризиків, що є принципово важливим для новітніх судових технологій із високим рівнем невизначеності. Це дозволяє адаптувати модель до різних типів суден, конфігурацій роторних установок та умов експлуатації, а також використовувати її для аналізу сценаріїв зміни режимів роботи системи. Доведено, що застосування ієрархічного групування ризиків підвищує точність оцінки та створює основу для подальшого управління безпечністю експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованої методики при проектуванні суден із роторами Флетнера, оцінці технічної придатності систем, підготовці експлуатаційних регламентів, виборі пріоритетних заходів технічного вдосконалення та формуванні процедур підготовки екіпажу. Застосування інтегрованого підходу дозволяє підвищити обґрунтованість рішень щодо впровадження роторних технологій, знизити рівень експлуатаційної невизначеності та забезпечити відповідність сучасним вимогам безпеки й енергоефективності морського транспорту.

Перспективою подальших досліджень є поглиблення кількісного моделювання ризиків із використанням CFD-аналізу, сценарного прогнозування та адаптації методики до конкретних типів морських транспортних засобів

### ЛІТЕРАТУРА

1. Traut M., Gilbert P., Walsh C., Bows A., Filippone A., Stansby P., Wood R. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes. *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 362–372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
2. A. De Marco, S. Mancini, C. Pensa, G. Calise, and F. De Luca. Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Rotating Machinery Volume 2016, Article ID 3458750, 12 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3458750>
3. Rodney D.W. Bowersox, Simon W. North, Erratum to «Algebraic turbulent energy flux models for hypersonic shear flows» [Prog. Aerosp. Sci. 46 (2010) 49–61], *Progress in Aerospace Sciences*, Volume 50, 2012, Page 35, ISSN 0376-0421, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.001>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042112000231>)
4. Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 476. P. 303–334. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112002002938>
5. Kenichi Kume, Tatsuya Hamada, Hiroshi Kobayashi, Shota Yamanaka, Evaluation of aerodynamic characteristics of a ship with flettner rotors by wind tunnel tests and RANS-based CFD. *Ocean Engineering*, Volume 254, 2022, 111345, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111345>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822007351>)
6. DNV. Recommended practice DNV-RP-A203: Technology qualification. Oslo: DNV, 2021. URL: <https://www.dnv.com>
7. You Dong, Dan M. Frangopol, and Samantha Sabatino A Decision Support System for Mission-Based Ship Routing Considering Multiple Performance Criteria. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 150, June 2016, Pages 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.res.2016.02.002>
8. Fabian Tillig, Jonas W. Ringsberg, Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships, *Ocean Engineering*, Volume 211, 2020, 107603, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107603>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801820306077>)
9. International Maritime Organization. Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2 9 April 2018). London: IMO, 2018. URL: <https://wwwcdn.imo.org>
10. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018. URL: <https://cdn.standards>
11. Kalinichenko, Y., Vasalati, N., Rossomakha, O., Koliesnik, O., Sagaydak, O., Oberto Santana, L. et al.; Kalinichenko, Y. (Ed.) (2025). Some issues of increasing the energy efficiency of ships by improving navigation methods. Tallinn: Scientific Route OÜ. doi: <https://doi.org/10.21303/978-9908-9706-4-6>
12. Томчаковський, Г., Россомаха, О., Оберто Сантана, Л., Саф'ян, О., & Колесник, О. (2025). Аналіз людського елементу в контексті розвитку морських автономних надводних суден. *Вісник Одеського національного морського університету*, (75), 108-121. <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-108-121>

### REFERENCES

1. Traut M., Gilbert P., Walsh C., Bows A., Filippone A., Stansby P., Wood R. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes // *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 362–372. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.026>
2. De Marco A., Mancini S., Pensa C., Calise G., De Luca F. Flettner Rotor Concept for Marine Applications: A Systematic Study // *International Journal of Rotating Machinery*. 2016. Article ID 3458750. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/3458750>
3. Bowersox R. D. W., North S. W. Erratum to “Algebraic turbulent energy flux models for hypersonic shear flows” // *Progress in Aerospace Sciences*. 2012. Vol. 50. P. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2012.03.001>
4. Mittal S., Kumar B. Flow past a rotating cylinder // *Journal of Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 476. P. 303–334. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112002002938>
5. Kume K., Hamada T., Kobayashi H., Yamanaka S. Evaluation of aerodynamic characteristics of a ship with Flettner rotors by wind tunnel tests and RANS-based CFD // *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 254. 111345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111345>
6. DNV. Recommended practice DNV-RP-A203: Technology qualification. Oslo: DNV, 2021.

7. Dong Y., Frangopol D. M., Sabatino S. A Decision Support System for Mission-Based Ship Routing Considering Multiple Performance Criteria // Reliability Engineering & System Safety. 2016. Vol. 150. P. 190–201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2016.02.002>
8. Tillig F., Ringsberg J. W. Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships // Ocean Engineering. 2020. Vol. 211. 107603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107603>
9. International Maritime Organization. Formal Safety Assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC-MEPC.2/Circ.12/Rev.2, 9 April 2018). London: IMO, 2018.
10. IEC 60812:2018. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2018.
11. Kalinichenko Y. та ін. Some issues of increasing the energy efficiency of ships by improving navigation methods. Tallinn: Scientific Route OÜ, 2025. DOI: <https://doi.org/10.21303/978-9908-9706-4-6>
12. Tomchakovskiy H., Rossomakha O., Oberto Santana L., Safian O., Koliesnik O. Analiz liudskoho elementu v konteksti rozvytku morskyykh avtonomnykh nadvodnykh suden // Visnyk Odeskoho natsionalnoho morskoho universytetu. 2025. № 75. P. 108–121. DOI: <https://doi.org/10.47049/2226-1893-2025-1-108-121>

**O.A. Rossomakha**

## **AN INTEGRATED APPROACH TO RISK ASSESSMENT OF FLETTNER ROTORS ON MARINE VESSELS**

*This article examines the assessment of risks associated with the use of Flettner rotors on seagoing vessels as elements of wind-assisted propulsion in the context of implementing energy-efficient technologies in modern shipping. The relevance of the study is justified by the need to reduce fuel consumption, cut greenhouse gas emissions, and ensure the safe integration of alternative propulsion systems into ship power plants. An analysis of current scientific approaches to assessing the efficiency and safety of Flettner rotors was conducted; it was found that existing studies are primarily focused on the aerodynamic and energy characteristics of the system, while issues of comprehensive risk assessment remain insufficiently developed.*

*An integrated approach to risk assessment is proposed, combining hazard identification procedures, FSA principles, HAZID/HAZOP elements, and the quantitative determination of an integral risk indicator. Within the scope of the study, risks were systematized into the following main groups: technical, aerodynamic, navigational, operational, human-related, as well as regulatory and environmental. It was established that aerodynamic and navigational factors have the greatest impact on the overall risk level, as they determine the vessel's seakeeping, maneuverability, and system stability under various operating conditions.*

*A framework for an integrated risk indicator has been developed that takes into account the probability of hazardous events occurring, the severity of their consequences, and the relative importance of individual risk groups, thereby enabling a formalized assessment of the safety of using Flettner rotors for various types of vessels and operational scenarios. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed methodology during the design, technical integration, operational control, and preparation of recommendations for risk minimization when implementing wind-assisted propulsion technologies in maritime transport.*

**Keywords:** Flettner rotors, wind-assisted propulsion (WASP), seagoing vessel, risk assessment, integrated risk index, navigation safety, energy efficiency.

Стаття прийнята 14.03.2026