

©Голіков В.В., Калініченко Є.В., Заєць А.Ю.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИНХРОННОГО ТА ПАРАМЕТРИЧНОГО КОЧЕННЯ НА МОРЕХІДНІ ЯКОСТІ КОНТЕЙНЕРОВОЗІВ

У статті досліджено механізми небезпечного кочення великих контейнеровозів, що призводять до масової втрати контейнерів у штормових умовах та створюють безпосередню загрозу безпеці судноплавства. На основі аналізу аварійних випадків ONE APUS (параметричне кочення) та MSC ZOE (синхронне кочення) встановлено ключові фактори розвитку резонансних режимів і сформовано узагальнену аварійну модель. Запропоновано оперативні рекомендації для судноводіїв щодо попередження небезпечного кочення та концепцію інформаційно-аналітичного модуля Roll Risk Index для інтеграції в системи ECDIS та погодної маршрутизації. Обґрунтовано економічну доцільність впровадження комплексу організаційно-технічних заходів з позицій запобігання рідкісним катастрофічним подіям.

Ключові слова: поперечна остійність, параметричне кочення, синхронне кочення, безпека судноплавства, контейнеровоз, SGISC, кріплення контейнерів, Roll Risk Index.

Вступ. Зростання розмірів контейнеровозів великої місткості та концентрація лінійних сервісів у шельфових районах зміщують фокус з абстрактних розрахунків остійності до реальної поведінки судна в хвилюванні. Серія резонансних аварій із масовою втратою контейнерів на надвеликих контейнеровозах (зокрема ONE APUS та MSC ZOE) показала, що формальне виконання статичних критеріїв остійності не гарантує безпеки судноплавства в умовах складного хвилювання [8]. У центр сучасної дискусії виходять саме динамічні режими кочення та здатність екіпажу вчасно розпізнати й уникнути параметричного й синхронного резонансу.

Аналіз літератури та постановка проблеми. Теоретичні основи параметричного кочення закладено в класичних роботах Paulling і Rosenberg [1], де вперше показано можливість нестійких коливань через нелінійну взаємодію. Сучасний розвиток цих ідей відображено в критеріях другого покоління непошкодженої остійності IMO (SGISC) [3, 4], які формалізують параметричне кочення як окремий режим динамічної нестійкості. Класифікаційні товариства ABS [5] та ClassNK [6] розробили спеціалізовані керівництва з оцінки вразливості контейнеровозів до параметричного резонансу. Галузевий проєкт TopTier (MARIN) [7] узагальнив практичний досвід аварій і створив операційні рекомендації для екіпажів. Синхронне кочення традиційно розглядалося як «класична» проблема вимушених коливань, проте аналіз сучасних інцидентів [10, 11] показав його критичну роль для ULCV на мілководді. Загальні питання динамічної остійності детально висвітлено в сучасних оглядах [15].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри наявність теоретичних критеріїв та окремих керівництв, відсутня інтегрована методика оцінки ризику небезпечного кочення в реальному часі, зрозуміла для містка. Існуючі підходи орієнтовані на етап проєктування й не забезпечують судноводіїв простими операційними інструментами розпізнавання та уникнення резонансних режимів у конкретних умовах рейсу.

Метою роботи є формування відтворюваної методики оцінки небезпечного кочення на основі аналізу репрезентативних аварійних кейсів, розробка оперативних рекомендацій для судноводіїв і обґрунтування концепції інтегрованого інформаційно-аналітичного модуля підтримки рішень для уникнення параметричного та синхронного кочення, які спрямовані на підвищення безпеки судноплавства в штормових умовах.

Основна частина. Теоретичні основи небезпечного кочення. Кочення судна описується нелінійним диференціальним рівнянням поперечного кутового руху, де відновлювальна

характеристика визначається кривою правлячого плеча $GZ(\varphi)$ та початковою метацентричною висотою GM [3]. Власний період кочення судна оцінюється за формулою:

$$T_{\varphi} = 2\pi \sqrt{\frac{k^2 \varphi}{g \cdot GM}}$$

де $k\varphi$ – радіус інерції мас судна у коченні, g – прискорення вільного падіння. Параметричне кочення виникає через періодичну зміну поперечної остійності судна під впливом хвильового профілю [1, 2]. Коли носова й кормова частини опиняються на гребенях хвиль, а міделевий переріз – у западині, GM зростає; при зворотній конфігурації GM зменшується. Якщо частота цієї параметричної зміни близька до подвоєної власної частоти кочення, система потрапляє у резонанс, і навіть малі початкові крени призводять до швидкого зростання амплітуд до небезпечних значень [5]. Найбільш схильними є судна з вираженими повними форштевнями й ахтерштевнями – саме великі контейнеровози [2]. Синхронне (резонансне) кочення відноситься до режимів змушених коливань, коли період зовнішнього хвильового моменту крену виявляється близьким до власного періоду кочення судна [15]. На відміну від параметричного кочення, тут основним «двигуном» є сам хвильовий момент, який у кожен напівперіод діє в один фазовий спосіб відносно руху судна, підсилюючи наявні коливання. Для великих контейнеровозів ризик особливо високий через поєднання великої ширини, значної початкової остійності (короткий період кочення) та високих палубних штабелів, де бічні прискорення зростають значно швидше.

Аналіз аварійних випадків. Методологія дослідження базувалася на детальній реконструкції двох репрезентативних аварійних подій з використанням офіційних звітів розслідування [9, 10], даних VDR/AIS, метеоінформації та відомостей про завантаження. Контейнеровоз ONE APUS (GT 146 694, довжина 364,15 м, 7 016 контейнерів на борту) у рейсі з Янтяню до Лонг-Біч 30 листопада – 1 грудня 2020 року потрапив у зону високих хвиль у північній частині Тихого океану. За даними Japan Transport Safety Board [9], судно близько трьох годин рухалося в умовах, схильних до параметричного кочення: довгі свели 5–6 м підходили з сектору 30–60° відносно лівого борту корми при курсі 120–140° і швидкості 11–14,5 вузлів. Амплітуда крену поступово зросла з 10–12° до 25–27°, що суттєво перевищило припущену в програмі розрахунку лашингів амплітуду 16,1°. О 00:58–00:59 1 грудня відбулося масове руйнування штабелів: 1841 контейнер втрачено за борт, 983 пошкоджено на палубі. Офіційний висновок JTSA [9] підкреслює, що ключовим фактором стала комбінація: напрямок свелів у кормовому секторі, довгий період хвилі з періодичною зміною миттєвого GM судна, а також вибір курсу й швидкості, що підтримували резонансний режим. Контейнеровоз MSC ZOE (GT 192 237, довжина 395,46 м, 13 468 контейнерів) у ніч з 1 на 2 січня 2019 року втратив 342 контейнери в районі TSS Terschelling–German Bight у штормових умовах Північного моря. За даними спільного звіту Dutch Safety Board та BSU [10], судно рухалося курсом 60–72° зі швидкістю 7,8–10,6 вузлів, коли хвилі висотою ~5,5 м з періодом 12–13 с підходили переважно з лівого борту. Екіпаж зафіксував серію з шести послідовних надмірних кренів, після чого частина палубних штабелів обвалилася [11, 12]. Це типовий сценарій синхронного кочення: на фоні відносно помірною кочення 5–10° відбувся короткочасний сплеск амплітуд через резонанс між періодом хвилі та власним періодом кочення ULCV на мілководді. Мілководні ефекти трансформували хвильовий спектр так, що період зближився з власним, підсилюючи вимушене кочення [11]. Порівняльний аналіз двох випадків виявив як спільні закономірності, так і критичні відмінності. Обидва судна формально відповідали чинним вимогам остійності [3] й використовували сертифіковані програми розрахунку лашингів відповідно до CSS Code [13]. В обох випадках критичну роль відіграли не екстремальні висоти хвиль (5–6 м), а специфічні комбінації курсу, швидкості, періоду хвилі та особливостей акваторії. Для ONE APUS домінував механізм параметричного кочення в попутно-косих хвилях із поступовим наростанням амплітуд протягом кількох годин [9]. Для MSC ZOE – синхронне кочення в бортових хвилях із раптовими серіями надмірних кренів на мілководді [10, 11]. В обох випадках екіпаж намагався змінювати курс і швидкість, але ці зміни були недостатньо радикальними й не виводили судно з резонансної зони.

Проаналізувавши окремо випадки ONE APUS та MSC ZOE, доцільно сформувані інтегровану аналітичну структуру для систематичного порівняння інцидентів за комплексом показників: гідрометеорологічна обстановка, динамічні характеристики кочення, параметри завантаження та системи кріплення, цифрові дані для реконструкції події (таблиця 1). Комплексне застосування інформаційних технологій – записів систем реєстрації даних рейсу (VDR), треків автоматичних ідентифікаційних систем (AIS), електронних картографічних навігаційних систем (ECDIS), численних метеомоделей, спеціалізованого ПЗ для розрахунку кріплення вантажів та програм моделювання динаміки судна – забезпечує перехід від описової характеристики подій до об'єктивного кількісного аналізу механізмів параметричного та синхронного кочення.

Таблиця 1 – Цифрові джерела та ІТ-інструменти, задіяні/потенційно доступні при аналізі інцидентів

Аспект	ONE APUS	MSC ZOE
Суднові записи	VDR (курс, швидкість, крен, прискорення, переговори, сигнали), ECDIS-трек, журнали ГД, баластні операції	VDR (навігаційні параметри, кочення, переговори), AIS-дані, ECDIS-трек
Зовнішні дані	Погодна маршрутизація (WRS), прогноз та hindcast хвиль (WW3/ECMWF), карти ізобар	Гідрометеорологічні дані Пн. моря, моделі хвиль з урахуванням мілководдя, припливів і течій
Моделювання руху	Чисельні 6-DOF моделі (параметричне кочення) на основі гідродинамічних коефіцієнтів; моделювання NMRI за дорученням JTSC APUS Full Report	Чисельні моделі кочення на мілководді, які замовлялися BSU/TUHH та MARIN для оцінки ймовірних кутів крену й прискорень ZOE Interim_Investigation_Repor...
Програми кріплення	Lashing software, сертифікована LR 2016, з припущенням макс. амплітуди кочення $\sim 16^\circ$ (design roll) APUS Full Report	Розрахунки лашингів відповідно до правил класу й CSM (інформація частково в проміжних звітах)
Аналітика після інциденту	Детальний JTSC-репорт із прив'язкою крену, швидкості, курсу, хвиль; частина аналізу увійшла в роботу MARIN TopTier	Спільні дослідження BSU, Dutch Safety Board, MARIN, Deltares, TUHH; фокус на зв'язку «мілководдя – хвиля – кочення» ZOE Interim Investigation Repor...

Значення цифрових даних для відтворення аварійних сценаріїв. Обидва інциденти відбулися в умовах сучасного цифрового мореплавства, де кожен елемент рейсу документується електронними системами: від навігаційних треків та реєстраторів даних до журналів маршрутною оптимізації та протоколів програм кріплення.

Аналіз динамічних режимів через призму цифрових параметрів. Застосування комплексного ІТ-підходу уможливило систематизацію різноманітних інцидентів у єдиній аналітичній площині: замість якісних описів надмірного кочення аналізуються кореляційні залежності між курсом, швидкістю, креном, періодом хвилі та глибиною акваторії. Ключові параметри систематизовано в порівняльній формі (таблиця 2).

Застосування інформаційних технологій продемонструвало, що номінально прийнятні для ультравеликих контейнеровозів висоти хвиль (H_s близько 5–6 м) в обох ситуаціях трансформувалися у критичні режими кочення. Ключовим фактором стала не абсолютна величина хвилювання, а синергетична дія періоду, напрямку та глибини поширення хвиль у поєднанні з параметрами руху судна, що створило резонансні умови.

Таблиця 2 – Узагальнене порівняння динамічних характеристик кочення

Параметр	ONE APUS (параметричне кочення)	MSC ZOE (синхронне кочення)
Район	Північний Тихий океан, глибоководний сектор NW від Гаваїв	Північне море, мілководний район TSS Terschelling–German Bight
Характер хвиль	Довгі свели 5–6 м, напрямом 30–60° від корми лівого борту	Штормові хвилі Hs ~5,5 м з лівого борту (N–NNW), період 12–13 с
Режим руху	Курс ~120–140°, швидкість 11–14,5 вуз; зміни курсу не виводили з резонансної зони	Курс ~60–72° через TSS, швидкість 7,5–10,5 вуз; курс обмежений схемою руху
Тип резонансу	Параметричний: періодична зміна GM і кривої GZ у такт із хвилями	Вимушений: період хвилі ~ власний період кочення ULCV на мілководді
Характер кренів	Повільне наростання до 20–27°, майже симетричне «борт–борт»	Серії раптових сильних кренів (6 послідовних), суперпозиція на «звичайне» кочення 5–10°
Зв'язок із ІТ	Детальний аналіз VDR, чисельне моделювання NMRI, зіставлення з прогнозом/маршрутизацією	Аналіз VDR/AIS, моделі хвиль на мілководді (MARIN, Deltares, TUHH), оцінка прискорень та кренів

Цифровий аналіз випадку ONE APUS виявив чіткий причинно-наслідковий зв'язок між моментом екстремального крену та сукупністю параметрів: напрямом руху 120°, швидкість близько 11,7 вузла, довгохвильові свели висотою 5–6 м з кормового лівобортного сектора, початкова метацентрична висота 1,6 м – за наявності циклічної модуляції остійності, типової для параметричного кочення.

Для MSC ZOE числове моделювання хвильових процесів та аналіз маршруту в межах системи розділення руху виявили механізм розвитку аварії: при русі курсом 60–72° в умовах мілководдя відбулася видозміна характеристик хвилювання, внаслідок чого період хвилі наближався до власної частоти кочення судна, що інтенсифікувало вимушені коливання та призвело до повторюваних епізодів критичних кренів.

Застосування цифрових технологій на різних стадіях та системні вразливості. Компаративний аналіз також охоплює використання інформаційних систем у темпоральній послідовності подій. Для обох об'єктів дослідження ідентифіковано три функціональні стадії:

1. *Превентивна стадія* – прогностичне планування рейсу (сервіси оптимізації маршруту за метеоумовами, складання плану переходу, комп'ютерні розрахунки систем кріплення).

2. *Реактивна стадія* – безперервний моніторинг та оперативне реагування (навігаційна сенсорика, вимірювачі крену, електронні картографічні системи, радіолокаційне спостереження, людський фактор інтерпретації).

3. *Аналітично-коригувальна стадія* – постінцидентне дослідження та моделювання (державні та незалежні розслідування, комп'ютерне відтворення події науково-дослідними організаціями, галузева аналітика в межах спеціалізованих програм).

Функціональна роль цифрових технологій на кожній стадії представлена в табличній формі (таблиця 3).

Компаративний аналіз демонструє, що критичні вразливості зосереджені не в дефіциті інформації, а в неефективності її трансформації у практичні індикатори ризику для судноводіїв. Обидва судна були обладнані сучасними навігаційними комплексами, системами метеопрогнозування та програмним забезпеченням розрахунку кріплення вантажів, однак відсутня була «інформаційно-аналітична надбудова», яка б забезпечила практичне застосування теорії динамічної остійності на ходовому містку через зрозумілі сигнали:

- «Актуальна конфігурація курсу/швидкість/хвилювання знаходиться в зоні критичного ризику параметричного кочення»;

- «Поточні навігаційні параметри на обмеженій глибині наближаються до резонансного режиму кочення».

Таблиця 3 – Роль інформаційних технологій на етапах «до – під час – після» інцидентів

Етап	ONE APUS	MSC ZOE
До інциденту	Погодний маршрутизатор (WRS) пропонував обхід найбільш несприятливих зон, але неявно враховував ризик параметричного кочення; лашинг-програма оперувала фіксованою design roll amplitude (~16°), без динамічного перерахунку при зміні маршруту	Рейсове планування з урахуванням TSS; обмежена свобода вибору курсу через схему руху; ризики резонансного кочення на мілководді явно не відображалися в стандартній метеоінформації
Під час інциденту	Дані VDR, ECDIS, креноміри були доступні, але не агреговані в «індикатор параметричного кочення»; капітан візуально не міг визначити напрямок хвиль у темряві, а система підтримки рішень не пропонувала «заборонені» поєднання курс/швидкість	Екіпаж мав доступ до креномірів та метеоданих, але не мав розрахунку «resonant speed/heading» для конкретних хвильових умов у TSS; рішення змінити швидкість і курс не виводили судно з резонансу
Після інциденту	Глибока цифрова реконструкція (NMRI, JTSA) стала базою для оновлення рекомендацій щодо параметричного кочення; дані рейсу використані в TopTier як референтний кейс	Чисельні дослідження MARIN, Deltares, TUNH лягли в основу рекомендацій щодо TSS, глибин, обмежень для ULCV у штормових умовах, а також у перегляд оцінок ризику резонансного кочення на мілководді

Подібні інформаційні рішення наразі перебувають у стадії розробки та апробації в межах галузевих програм (зокрема, TopTier) та проєктів класифікаційних організацій, де інтеграція масивів даних AIS/VDR, метеорологічних моделей та цифрових описів геометрії корпусу дозволяє формувати прогностичні моделі вразливості судна до різних типів небезпечного кочення.

Концептуальні висновки для подальшого дослідження. Порівняльний аналіз інцидентів ONE APUS та MSC ZOE з позицій інформаційних технологій обґрунтовує наступні концептуальні положення:

Перше положення: детальна цифрова документація процесів не гарантує запобігання аварійних ситуацій за відсутності інтеграції даних у прості для інтерпретації екіпажем індикатори ризику та їх врахування в алгоритмах оптимізації маршруту й системах розрахунку кріплення.

Друге положення: обидва кейси ілюструють обмеженість традиційних статичних методів (фіксовані розрахункові амплітуди кочення, оцінка лише висоти хвилі без аналізу періоду зустрічі) для ультравеликих контейнеровозів; актуальною є потреба в динамічних, інформаційно-підтримуваних моделях, що враховують реальний спектр кочення в змінних умовах експлуатації.

Третє положення: цифровий підхід до аналізу створює методологічну основу для інтегрованих систем підтримки судноводійних рішень, що в режимі реального часу (використовуючи VDR-подібну сенсоріку, метеорологічні моделі та прецедентну базу даних) ідентифікуватимуть ризикові комбінації навігаційних параметрів та генеруватимуть рекомендації щодо превентивних маневрів.

Сформульовані положення деталізуються у формі пропозицій щодо архітектури інформаційно-аналітичного модуля для оцінки ризику кочення з інтеграцією в ECDIS та системи погодної маршрутизації, а також у вигляді рекомендацій з актуалізації нормативної бази з урахуванням потенціалу сучасних інформаційних технологій.

Оперативні рекомендації та організаційно-технічні заходи. На основі аналізу механізмів небезпечного кочення та реконструкції аварійних випадків розроблено комплекс оперативних рекомендацій для судноводіїв, побудований на чотирьох принципах:

- ризико-орієнтованість (уникати специфічних комбінацій курс/швидкість/хвиля);
- судно-специфічність (враховувати власний період кочення та завантажувальний стан);
- динамічність (оцінка ризику в реальному часі);
- людино-центричність (прості інструкції замість складних розрахунків).

Цей підхід узгоджується з рекомендаціями ClassNK [6] та результатами проєкту TopTier [7].

Для параметричного кочення алгоритм дій включає:

- визначення типу кочення за напрямком хвиль (head/following, $\pm 30\text{--}45^\circ$ від діаметра) та характером «накачування» амплітуд [5, 6];
- оцінку поточної комбінації курс/швидкість відносно періоду хвилі; зміну режиму руху достатньо різко ($\geq 20\text{--}30\%$ швидкості та/або $\geq 30^\circ$ курсу) для зриву резонансу;
- уникнення одночасного надмірного зменшення швидкості й повороту на попутні хвилі (ризик surf-riding) [4];
- документування параметрів для подальшого аналізу.

Для синхронного кочення рекомендації акцентують:

- аналіз курсу відносно бортових/косих хвиль та періоду хвилі щодо власного періоду кочення;
- вихід із небезпечного сектору курсів (перехід від beam seas до quartering або head/following);
- суттєву зміну швидкості для порушення резонансу; мінімізацію тривалості руху в beam seas, особливо на мілководді [11];
- узгодження дій з обмеженнями TSS при необхідності відхилення від рекомендованої лінії [10].

Організаційно-технічні заходи охоплюють три рівні. Нормативно-управлінський: актуалізація Cargo Securing Manual із включенням динамічних обмежень по коченню; вбудування вимог CSS Code [13] і STU Code [14] у систему управління безпекою; систематичний моніторинг випадків втрати контейнерів. Такий підхід дозволяє розглядати контроль динамічної остійності як невід’ємну складову загальної культури безпеки судноплавства компанії-оператора. Технічне оснащення: модернізація систем стовцювання й закріплення контейнерів [13, 14]; системи зниження амплітуди кочення (анти-ролл танки, фін-стабілізатори) [6]; конструктивні зміни корпусу для зменшення вразливості до резонансних режимів [2, 5]. Цифрові системи: встановлення датчиків крену, прискорень і лашингових зусиль; інтеграція з ECDIS і погодною маршрутизацією [7]; автоматичне попередження при досягненні критичних порогів. Центральним елементом запропоновано концепцію інформаційно-аналітичного модуля Roll Risk Index (RRI), який поєднує дані про власний період кочення судна в поточному завантажувальному стані, прогноз хвильового спектра (період, напрямок, трансформація на мілководді), критерії вразливості SGISC [4] та фактичні записи хитавиці. Модуль видає містку інтуїтивно зрозумілий індикатор ризику («зелена/жовта/червона» зони) та рекомендовані дії при підвищенні ризику [7]. RRI інтегрується в існуючі системи ECDIS та погодної маршрутизації, доповнюючи традиційні показники (Hs, напрямок вітру) оцінкою специфічних ризиків кочення для конкретного судна.

Економічне обґрунтування. Аналіз показав, що навіть при статистично малій частці втрачених контейнерів (576 з 250 млн перевезених у 2024 році, або 0,0002%) [8] один великий інцидент здатен створити збитки порядку 150–200 млн дол. США (прямі втрати вантажу, ремонт, простої, страхові вимоги) [9] плюс екологічні витрати, які є безповоротними для унікальних екосистем [11, 12]. Сукупні витрати на впровадження комплексу організаційних, технічних та ІТ-заходів (оновлена SMS, тренажерні програми, інформаційний модуль RRI, базовий моніторинг лашингів) оцінюються як 1–2% капітальних витрат на новобудову або співставні з вартістю декількох портових ремонтів, що істотно менше потенційних збитків від навіть одного великомасштабного інциденту за життєвий цикл судна.

Висновки. Дослідження показало, що забезпечення безпеки судноплавства для контейнеровозів великої місткості неможливе без врахування динамічних режимів, а саме небезпечне кочення слід розглядати як ризик, що безпосередньо впливає на безпеку судноплавства. Сформовано узагальнену аварійну модель розвитку параметричного та синхронного кочення на основі реконструкції випадків

ONE APUS [9] і MSC ZOE [10, 11] з урахуванням гідрометеорологічних, експлуатаційних та лашингових факторів. Запропоновано структурований комплекс оперативних рекомендацій для містка, побудований на принципах ризик-орієнтованості, судно-специфічності, динамічності та людино-центричності, що узгоджується з найкращими практиками галузі [6, 7]. Розроблено концепцію інформаційно-аналітичного модуля Roll Risk Index для інтеграції в системи ECDIS та погодної маршрутизації на основі критеріїв SGISC [4]. Впровадження цього модуля суттєво посилює безпеку судноплавства, забезпечуючи перехід від реактивних дій після інциденту до превентивного уникнення резонансних зон. Обґрунтовано економічну доцільність впровадження комплексу заходів з позицій запобігання рідкісним катастрофічним подіям [8, 9] та мінімізації екологічних збитків [12].

Встановлено, що інтеграція запропонованого модуля RRI безпосередньо підвищує рівень безпеки судноплавства, оскільки надає судноводію інструмент проактивного виявлення загроз, нівелюючи розрив між формальними вимогами остійності та реальними штормовими умовами.

Перспективи подальших досліджень полягають у валідації запропонованого модуля RRI на основі даних реальних рейсів, розробці стандартизованих тренажерних сценаріїв і інтеграції критеріїв ризику кочення в системи погодної маршрутизації нового покоління.

REFERENCES

1. Paulling, J. R., & Rosenberg, R. M. (1959). On unstable ship motions resulting from nonlinear coupling. *Journal of Ship Research*, 3, 36–46.
2. Shin, Y. S., Belenky, V. L., Paulling, J. R., Weems, K. M., & Lin, W. M. (2004). Criteria for parametric roll of large containerhips in longitudinal seas. *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 112, 14–47.
3. International Maritime Organization. (2020). International code on intact stability, 2008 (2008 IS Code) (2020 ed.). London: IMO.
4. International Maritime Organization. (2020). MSC.1/Circ.1627: Interim guidelines on the second generation intact stability criteria. London: IMO.
5. American Bureau of Shipping. (2004). Guide for the assessment of parametric roll resonance in the design of container carriers (with amendments). Houston, TX: ABS.
6. ClassNK. (2023). Guidelines on preventive measures against parametric rolling (Ed. 1.0). Tokyo: Nippon Kaiji Kyokai.
7. Maritime Research Institute Netherlands. (n.d.). TopTier – Joint industry project on container loss. Retrieved December 10, 2025, from <https://www.marin.nl/en/toptier>
8. World Shipping Council. (2023). Containers lost at sea – 2023 update. Washington, DC: WSC.
9. Japan Transport Safety Board. (2024). Marine accident investigation report: Container ship ONE APUS (MA2024-02). Tokyo: JTSB. Retrieved from https://jtsb.mlit.go.jp/eng-mar_report/2024/2022tk0001e.pdf
10. Bundesstelle für Seeunfalluntersuchung, & Dutch Safety Board. (2019). Joint interim investigation report on very serious marine casualty 3/19: Loss of containers on board MSC ZOE. Hamburg–The Hague: BSU & DSB.
11. Dutch Safety Board. (2020). Safe container transport north of the Wadden Islands: Lessons learned following the loss of containers from MSC ZOE. The Hague: DSB.
12. Cedre. (n.d.). MSC ZOE spill. Retrieved December 10, 2025, from <https://wwz.cedre.fr/en/Our-resources/Spills/Spills/MSC-Zoe>
13. International Maritime Organization. (2011). Code of safe practice for cargo stowage and securing (CSS Code) (consolidated ed.). London: IMO.
14. International Maritime Organization, International Labour Organization, & United Nations Economic Commission for Europe. (2014). Code of practice for packing of cargo transport units (CTU Code). Geneva–London: IMO/ILO/UNECE.
15. Spyrou, K. J., Belenky, V. L., Katayama, T., Bačkalov, I., & Francescutto, A. (Eds.). (2023). Contemporary ideas on ship stability. Cham: Springer.

Golikov V.V., Kalinichenko Ye. V., Zaiets A.Yu.

RESEARCH ON THE IMPACT OF SYNCHRONOUS AND PARAMETRIC ROLLING ON THE SEAWORTHINESS OF CONTAINER SHIPS

The article investigates dangerous rolling mechanisms of large container ships leading to massive container losses in storm conditions. Based on analysis of ONE APUS (parametric rolling) and MSC ZOE (synchronous rolling) casualties, key factors of resonant regime development were identified and a generalized accident model was formed. Operational guidance for navigators on dangerous rolling prevention and the concept of Roll Risk Index information-analytical module for integration into ECDIS and weather routing systems are proposed. Economic feasibility of implementing organizational and technical measures is justified from the perspective of preventing rare catastrophic events.

Keywords: transverse stability, parametric rolling, synchronous rolling, shipping safety, container vessel, SGISC, container securing, Roll Risk Index.

Стаття прийнята 14.10.2025