

**Golovan A.I.****FEATURES OF THE MODELING METHODOLOGY AND INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING THE EFFICIENCY OF THE CARGO SHIP MAINTENANCE SYSTEM**

*The article explores enhancing maintenance systems for cargo ships. It examines recent research and publications revealing the necessity of monitoring maintenance system effectiveness and employing information and communication technologies to upgrade ship maintenance.*

*The purpose of this study is to establish and validate a methodology for modeling and constructing an information system to monitor the maintenance system's efficiency on cargo ships. The objective of the article is to create a comprehensive approach for modeling and constructing an information system that observes the maintenance system's performance as a component of an intelligent maintenance system's parameter management plan, utilizing the analytical center ShipDiMRO. The study examines systems that monitor the performance of maintenance systems for cargo ships. Whether equipped with an integrated CANopen network or not, these systems will be analyzed.*

*The ultimate goal of this research is to enhance the maintenance systems of cargo ships through effective monitoring, providing the ability to control for technical issues, plan maintenance, and detect malfunctions promptly.*

*The article presents a modeling methodology for monitoring cargo ship maintenance efficiency. The text explains the monitoring system structures and offers recommendations for their implementation. The conclusion emphasizes the importance of performance measurement for efficient maintenance. The study demonstrates the significance of utilizing various approaches in data analysis and technology application to ensure the system's reliability and efficiency. The research methodology relies on analyzing information flows and implementing information and communication technologies to guarantee dependable monitoring and control of maintenance effectiveness for cargo vessels.*

**Keywords:** *monitoring, maintenance, cargo ships, efficiency, information technology, data analysis.*

УДК 621.396:629.564.7

doi.org/10.33298/2226-8553.2023.2.38.04

*Давидов В.С., Кліндухова В.М., Ляшко О.В., Любарець І.О.*

**ПРО СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ РУХУ ВЕЛИКОГАБАРИТНОГО  
КОНТЕЙНЕРНОГО СУДНА У МІЛКОВОДНОМУ СТИСНУТОМУ РАЙОНІ В  
СКЛАДНИХ НАВІГАЦІЙНО-ГІДРОГРАФІЧНИХ І ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИХ  
УМОВАХ ПЛАВАННЯ**

*У статті обговорюється проблема забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів в умовах складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умов. Автори вказують на те, що впровадження електронних картографічних навігаційних систем (ЕКНІС) і глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) не призвело до значного зниження аварійності суден, зокрема при посадках на мілини. Розглядаються об'єктивні чинники, які в суттєвій мірі ускладнюють безпечне плавання великогабаритних суден, включаючи обмеження по експлуатації головної енергетичної установки і морехідні характеристики. Наявність великої вітрильності також ускладнює утримання суден на курсі. Конструктивні особливості суден, такі як довгий гальмівний шлях і*

наявність тільки одного гребного валу, також мають негативний вплив на їх маневреність і безпеку плавання. Вказується на недостатнє використання усіх наявних можливостей ГНСС для коригування траєкторії руху суден і вирішення навігаційних завдань в режимі реального часу. Габарити каналів і фарватерів також не завжди відповідають розмірам сучасних суден, що призводить до стиснення великогабаритних суден у можливості здійснення маневру і ризику посадок на мілини під час циркуляції. У статті пропонується підхід до оцінки показників навігаційної безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів шляхом розробки математичної моделі, яка б дозволила покращити безпеку їх плавання в складних умовах. Автори також вказують на можливість використання штучного інтелекту для автоматизації процесів керування суднами в небезпечних ситуаціях. Представлена математична модель руху великогабаритного судна контейнеровозу потребує подальшої розробки та проведення подальших досліджень та розробок для покращення безпеки плавання таких суден.

**Ключові слова:** безпека плавання, навігація, математична модель руху, складні умови, великогабаритний, судно контейнеровоз.

**Постановка проблеми.** Аналіз навігаційної аварійності в цілому свідчить, що друге місце за кількістю аварійних морських подій займають посадки суден на мілину, які як правило, є наслідком значних похибок у визначенні місця розташування судна на траєкторії руху, особливо на циркуляції, неможливості учасників судноводіння забезпечити навігаційну безпеку в складних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах плавання. Райони прибережного плавання, обмежені умови гаваней і портів, які характеризуються відносно малими глибинами і великою інтенсивністю судноплавства є місцем переважної кількості тяжких аварій. Найбільшу загрозу вони представляють для великотоннажних вантажних і пасажирських суден. За результатами досліджень Європейського агентства з безпеки на морі за 2021р. за попередні 7 років аварійність саме цих типів суден не зменшується та залишається, практично на одному рівні (рис.1) [1].

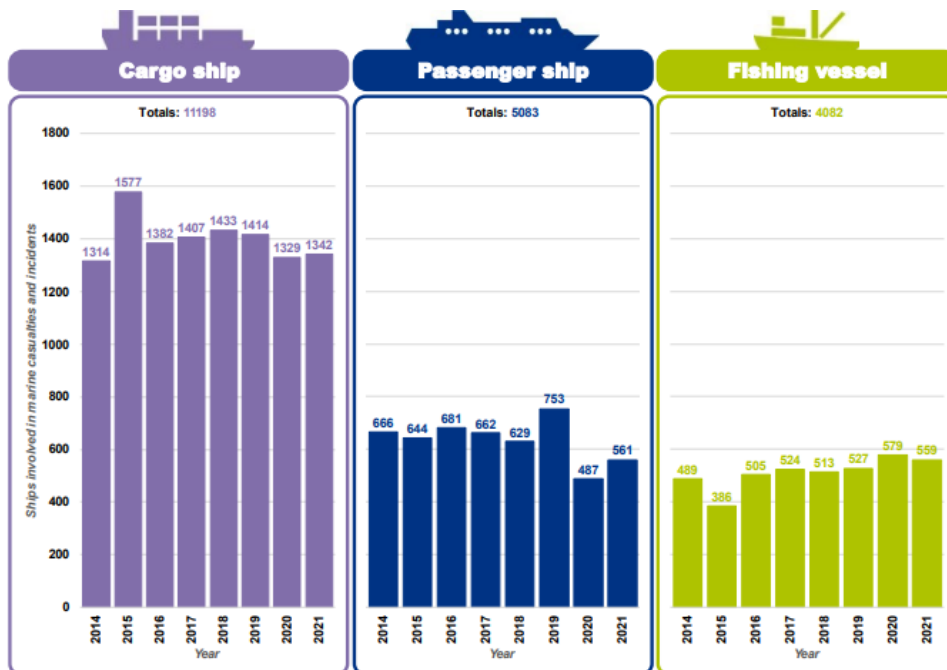


Рисунок 1 – Кількість АМП у період з 2014-2021 р. за типом суден

Поява на морських суднах електронних картографічних навігаційних систем (ЕКНІС) і приймачів глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС), які дозволили в значній мірі

автоматизувати високоточний контроль місця розташування суден на траєкторії руху в режимі «online», не привела до значного зниження аварійності, зокрема й пов'язаної з посадками на мілину [1]. Використання функцій: «завдання безпеки», «виявлення поточної небезпечної ізобати і небезпечних об'єктів», а також «автоматичного захоплення і супроводу цілей при накладенні зображення радіолокаційної станції (РЛС) на електронну карту (ЕК)» [2,3] в існуючих ЕКНІС, які використовуються при провідці суден в каналах і на акваторіях портів і гаваней не вирішує в повній мірі завдання безпечного плавання великогабаритних контейнеровозів в складних умовах. Цьому сприяють такі об'єктивні чинники, як: значна кількість обмежень по експлуатації головної енергетичної установки, морехідні характеристики і параметри маневрування.

Наприклад, для уникнення втрати керованості на малому ході і зменшення зносу від вітру, при наявності величезної вітрильності, необхідно тримати підвищену швидкість руху. Та наявність обмежень експлуатації судових дизелів (на прикладі дизеля марки SULZER 10RTA96C-B потужністю в 54942.6 кВт або 74700 к. с.), а саме мінімальних безпечних критичних обертів які складають 23 об/хв; що відповідає швидкості близько 7 вузлів; мінімальної швидкості самого малого переднього ходу 7.4 вузли, яка відповідає 26 об/хв та зменшеного до 70% коефіцієнта потужності рушія при роботі на задній хід. Велика вітрильність великотоннажних суден, яка для контейнеровозів, за площею дорівнює 3-м стандартним футбольним полям (площа 1-го футбольного поля  $S = 7560$  кв. м) ускладнює утримання судна на осі каналу або судового ходу [4]. Одногвинтова схема побудови головної енергетичної установки для великовантажних контейнеровозів в значній мірі знижує її надійність та призводить практично, до втрати керованості судна при виході з ладу, або заклинюванні рульового пристрою.

При маневруванні великогабаритних суден, виникають складнощі виведення судна в точку повороту і на нову лінію шляху через неможливість оперативного точного обліку відомими штурманськими способами зміщення полюса повороту і збільшення радіусу циркуляції при плаванні на мілководді при наявності сумарного зносу від вітру і різних видів течій. В судових ЕКНІС не в повній мірі використовуються можливості високоточного місця судна, отриманого за допомогою приймачів ГНСС, що працюють в спеціальних режимах, (точність яких порівнянна з точністю масштабу електронної карти) для коригування траєкторії руху судна по пеленгам і дистанціям на підводні і надводні навігаційні небезпеки від свого високоточного місця в автоматичному «online» режимі [2].

Габарити існуючих каналів і фарватерів доволі часто не відповідають габаритам сучасних великотоннажних суден, які в багатьох портах світу і на підходах до них обмежені своєю осадкою і розмірами. Це призводить, при плаванні на мілководді, до погіршення керованості і збільшення радіусів циркуляції, які не завжди підлягають точному обліку при плаванні на циркуляції і як наслідок виходу однієї з кінцівок судна за межі смуги руху, що й призводить до дотиків до ґрунту і посадок на мілину [5].

Конструктивні особливості суден і їх маневрені характеристики, закладені на стадії проектування також негативно впливають на безпеку плавання великогабаритних контейнеровозів: велика тоннажність суден визначає довгий гальмівний шлях як при пасивному так і активному гальмуванні, який становить тисячі метрів; значна частина сучасних суден - одновальні, що негативно позначається на їх маневреності та повороткості і з урахуванням дуже великої вітрильності, особливо контейнеровозів, автомобілевозів і газозовів, призводить до того, що часом, при сильному вітрі не вистачає зусиль гвинта-кермового комплексу для утримання суден в заданій смузі на траєкторії руху або на лінії створу [6].

Особливої уваги заслуговує неможливість судоводіїв великотоннажних суден з дуже великою вітрильністю з об'єктивних причин забезпечити навігаційну безпеку в складних швидкозмінних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах прибережного плавання після проходження точки «неповернення» [7].

Результати аналізу АМП, існуючих прибережних і портових систем руху суден, суднових і берегових навігаційних систем безпеки плавання, які використовуються при проводці суден в каналах і в акваторіях портів і гаваней дозволяють зробити висновок про те, що існуюча система безпеки плавання не вирішує в повній мірі завдання безпечного плавання великотоннажних суден в скрутних умовах.

**Мета роботи.** Створення математичної моделі руху великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі в складних навігаційно-гідрографічних і гідрометеорологічних умовах плавання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями математичної моделі руху судна займався Драчов В.М. та Я. Йошімура. У праці «Врахування циркуляції в стиснених умовах» Драчова В.М. було виконано аналіз математичних моделей керуваності судна на міліні, здійснено теоретичне обґрунтування залежностей, що визначають бокове і поздовжнє відхилення судна при виході на новий курс, та вплив мілін на елементи циркуляції.

У праці Я. Йошімури «Математична модель руху судна» було запропоновано і розроблено багато видів математичних моделей, які можна використовувати за допомогою обчислювальних інструментів. В результаті роботи було доведено, що кожна математична модель має свої переваги для конкретної мети моделювання [9].

У наукових дослідженнях та наукових статтях наведених вище авторів детально не розглядалися такі вкрай важливі для безпеки судноводіння питання як:

1. Вирішення існуючого протиріччя між знанням високоточного місця судна на траєкторії його руху за допомогою спеціальних режимів роботи ГНСС та недостатньо високою точністю контролю положення судна, щодо навігаційних небезпек, по пеленгах та дистанціях за допомогою суднових засобів автоматичної радіо прокладки (ЗАРП);

2. Не досліджено додаткові можливості ЕКНІС, щодо використання координатного курсору як високоточного кутомірно-далекомірного пристрою. У існуючих ЕКНІС не передбачено опцій або функцій, що дозволяють реалізувати можливості високоточного місця судна для вимірювання напрямків та дистанцій від кінцівок судна до навігаційних об'єктів за допомогою координатного курсору;

3. Прогнозування місцезнаходження носа та корми судна на траєкторії руху з урахуванням безперервно змінливих напрямів та відстаней до небезпечних навігаційних об'єктів, у тому числі підводних, та з урахуванням його інерційно-гальмівних характеристик;

4. Облік елементів поворотності судна з урахуванням впливу полюса повороту на поведінку судна при плаванні в водах з малими глибинами внутрішньо-портового та прибережного плавання;

5. Питання зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції;

6. Підвищення навігаційної інформативності про положення носа та корми судна на траєкторії руху на електронній карті, у тому числі, шляхом:

– постійного відображення фактичної траєкторії руху судна у вигляді лінії шляху до границі електронної карти та збереження її після зміни масштабу карти;

– відображення на лінії попередньої прокладки розрахункового місця судна відповідно до плану переходу.

**Виклад основних матеріалів дослідження.** Для забезпечення безпеки плавання великотоннажних суден контейнеровозів по запланованій траєкторії руху на циркуляції в мілководних стиснених умовах необхідно врахувати значну кількість різномірної інформації з безліччю різних параметрів, які після відповідної математичної обробки перетворюються на інформаційні дані та керуючі сигнали при вирішенні завдань навігації та управління. Модель забезпечення безпечного руху великотоннажних суден контейнеровозів по запланованій траєкторії руху на циркуляції в мілководних стиснених умовах покликана встановити алгоритмічну залежність вихідного ефекту запропонованої моделі, що визначається цільовою функцією  $F(T)$  та її показниками ефективності  $(\alpha)$  від сукупності параметрів  $(Y)$  [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11].

$$Y \in Z = \{F(T), \alpha \in G\}, \quad (1)$$

$$Y = Y(\bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3, \bar{A}_4, \bar{A}_5, \bar{A}_6, \bar{A}_7, \bar{A}_8, \bar{A}_9, \bar{A}_{10}, \bar{A}_{11}) \quad (2)$$

де,  $\bar{A}_1$  – основні техніко-експлуатаційні характеристики судна;

$\bar{A}_2$  – інерційно-гальмівні параметри судна;

$\bar{A}_3$  – параметри стійкості судна на циркуляції;

$\bar{A}_4$  – параметри повороткості судна;

$\bar{A}_5$  – параметри розташування носа і корми судна на траєкторії руху;

$\bar{A}_6$  – параметри розташування об'єктів в електронній базі ЕКНІС і кінця координатного курсору;

$\bar{A}_7$  – параметри гідрологічної обстановки;

$\bar{A}_8$  – параметри гідрометеорологічних умов;

$\bar{A}_9$  – параметри основних суднових та берегових засобів визначення місця розташування судна на траєкторії руху;

$\bar{A}_{10}$  – параметри зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції;

$\bar{A}_{11}$  – параметри роботи буксирів і підрулюючих пристроїв.

У розгорнутому вигляді перелічені параметри можна уявити наступним чином:

$$\bar{A}_1 = (L_{\max}, B_{\max}, D_{\text{пор}}, DW, W_{\text{кон.}}, V_{\max}, V_{\min}), \quad (3)$$

де,  $L_{\max}$  – довжина судна;

$B_{\max}$  – ширина судна;

$D_{\text{пор}}$  – вантажопідйомність судна;

$DW$  – дедвейт судна;

$W_{\text{кон}}$  – контейнерна вантажомісткість судна;

$V_{\max}$  – максимальна швидкість судна;

$V_{\min}$  – мінімальна швидкість судна

$$\bar{A}_2 = (S_{\text{ц}}, T_{\text{ц}}, S_{\text{пг}}, t_{\text{пг}}, S_{\text{ат}}, t_{\text{ат}}), \quad (4)$$

де,  $S_{\text{ц}}$  – відстань, яку проходить судно на запланованій циркуляції;

$T_{\text{ц}}$  – час руху на запланованій циркуляції;

$S_{\text{пг}}$  – відстань, яку проходить судно при пасивному гальмуванні;

$t_{\text{пг}}$  – час пасивного гальмування судна;

$S_{\text{ат}}$  – відстань, яку проходить судно при активному гальмуванні;

$t_{\text{ат}}$  – час активного гальмування судна.

$$\bar{A}_3 = (S_{\text{к}}, R_{\text{ц}}, \psi_{\text{с}}, \theta_{\text{с}}, X_{\text{р}}, V_{\text{кр}}, \Delta V_{\text{м}}, \Delta d_{\text{кр}}, \Delta d_{\text{в}}) \quad (5)$$

де,  $S_{\text{к}}$  – площа керма судна;

$R_{\text{ц}}$  – радіус циркуляції судна;

$\psi_{\text{с}}$  – диферент судна на ніс або корму;

$\theta_{\text{с}}$  – крен на правий або лівий борт судна;

$X_{\text{р}}$  – положення полюса повороту судна відносно центру мас;

$V_{\text{кр}}$  – критична швидкість судна;

$\Delta V_{\text{м}}$  – утрата швидкості за рахунок просідання на мілководді;

$\Delta d_{\text{кр}}$  – утрата посадки судна від крену;

$\Delta d_{\text{в}}$  – просідання судна на хвилюванні.

$$\bar{A}_4 = (l_1(\delta), l_2(\delta), l_3(\delta), D_{\text{т}}(\delta), D_{\text{в}}(\delta), T_{\mu}(V_{\text{н}}\delta), \Delta R), \quad (6)$$

де,  $l_1(\delta)$  – висув судна на циркуляції;

$l2(\delta)$  – зміщення судна на циркуляції;  
 $l3(\delta)$  – зворотне зміщення судна на циркуляції;  
 $Dт(\delta)$  – тактичний діаметр циркуляції судна;  
 $Dv(\delta)$  – діаметр циркуляції судна, що встановилася;  
 $T\mu(Vн, \delta)$  – період циркуляції судна;  
 $\Delta R$  – ширина смуги руху судна на циркуляції

$$\bar{A}_5 = (Vсх, lнс, lкс, Tпр, \varphiнс, \lambdaнс, \varphiкс, \lambdaкс, Mо), \quad (7)$$

де,  $Vсх$  – ширина суднового ходу;

$lнс$  – бічне та за курсом відхилення носу судна від запланованої траєкторії руху;

$lкс$  – бічне відхилення корми судна від запланованої траєкторії руху;

$Tпр$  – прохідна осадка судна;

$\varphiнс$  – географічна широта розташування носа судна;

$\lambdaнс$  – географічна довгота розташування носа судна;

$\varphiкс$  – географічна широта розташування корми судна;

$\lambdaкс$  – географічна довгота розташування корми судна;

$Mо$  – середньоквадратична похибка позиціонування носа і корми судна на траєкторії руху.

$$\bar{A}_6 = (\varphiкк, \lambdaкк, \varphiно, \lambdaно, \Piно, Dно, Mкк), \quad (8)$$

де,  $\varphiкк$  – широта кінця координатного курсору;

$\lambdaкк$  – довгота кінця координатного курсору;

$\varphiно$  – широта навігаційних орієнтирів в електронній базі ЕКНІС;

$\lambdaно$  – довгота навігаційних орієнтирів в електронній базі ЕКНІС;

$\Piно$  – справжній пеленг з носа (корми) судна на навігаційний орієнтир;

$Dно$  – відстань від носа (корми) судна до навігаційного орієнтиру;

$Mкк$  – середньоквадратична похибка вимірювання відстаней за допомогою координатного курсору.

$$\bar{A}_7 = (d, Hг, Hmin, \Delta hпад., \rho, Kт, Vт, \betaт), \quad (9)$$

де,  $d$  – допустима прохідна осадка;

$Hг$  – критерій гарантованої глибини плавання;

$Hmin$  – мінімально допустима глибина в районі плавання;

$\Delta hпад.$  – падіння рівня води при скиданні і при відливі;

$\rho$  – щільність морської води;

$Kт$  – напрямок течії;

$Vт$  – швидкість течії;

$\betaт$  – кут знесення на течії.

$$\bar{A}_8 = (Sп, qw, W, \alpha, hв, тв, \lambdaв, De, Pнгму), \quad (10)$$

де,  $Sп$  – площа вітрильності судна;

$qw$  – курсовий кут вітру;

$W$  – швидкість вітру, що здається;

$\alpha$  – кут дрейфу судна від вітру;

$hв$  – висота вітрової хвилі;

$тв$  – період вітрової хвилі;

$\lambdaв$  – довжина вітрової хвилі;

$De$  – географічна дальність видимого горизонту;

$Pнгму$  – ймовірність несприятливих гідрометеоумов

$$\bar{A}_9 = (Qрлс, Qгк, Qгнсс, Qбрлс, Qлд, Pмс), \quad (11)$$

де,  $Qрлс$  – експлуатаційні характеристики суднових радіолокаторів;

$Qгк$  – експлуатаційні характеристики суднових курсовказівників;

$Qгнсс$  – експлуатаційні характеристики ГНСС;

$Qбрлс$  – експлуатаційні характеристики берегових радіолокаторів;

$Q_{лд}$  – експлуатаційні характеристики лазерних далекомірів;

$P_{мс}$  – ймовірність отримання повної та достовірної інформації про місцезнаходження судна на траєкторії руху, що надходить від суднових та зовнішніх джерел навігаційної інформації.

$$\bar{A}_{10} = (F_B, M_B, R_K, M_K, V_{пц}, V_{кц}, V_{нц}, M_i), \quad (12)$$

де,  $F_B$  – бічна сила, яка викликана вітром;

$M_B$  – момент сили вітру;

$R_K$  – бокова сила керма;

$M_K$  – момент бокової сили керма;

$V_{пц}$  – швидкість судна до початку циркуляції;

$V_{кц}$  – швидкість судна в кінці циркуляції;

$V_{нц}$  – небезпечна швидкість судна на циркуляції;

$M_i$  – накопичений, чинний момент інерції.

$$\bar{A}_{11} = (R_{\Sigma}, F_{ГВ}, F_{ШБ}, F_{ГК}, F_{ПУ}), \quad (13)$$

де,  $R_{\Sigma}$  – сумарний опір води та повітря судну та буксирам;

$F_{ГВ}$  – сила, що створюється гребним гвинтом;

$F_{ШБ}$  – сила штовхання, що створюється буксирами;

$F_{ГК}$  – сила на гаке кормового буксира, що гальмує;

$F_{ПУ}$  – сила, що створюється підрулюючими пристроями.

Цілком логічно, що для забезпечення безпеки плавання великогабаритних суден контейнеровозів, всі параметри функції (1) повинні мати оптимальні значення. Ці параметри не мають важливого значення при плаванні судна в відкритому морі, проте при плаванні великогабаритних контейнеровозів на мілководді, знання значень цих параметрів буде дуже корисним для судноводіїв.

Отже перші параметри -  $\bar{A}_1$ , основні техніко-експлуатаційні характеристики судна. Як видно з формули (3) основні техніко-експлуатаційні характеристики судна – це довжина судна, ширина судна, вантажопідйомність судна, дедвейт судна, контейнерна вантажомісткість судна, максимальна швидкість судна та мінімальна швидкість судна. Всі ці характеристики так чи інакше мають вплив на керованість та стійкість судна. Особливу увагу, слід приділити мінімальній швидкості. Тому що при плаванні на мілководді судно повинно рухатись з якомога меншою швидкістю задля мінімізації гідродинамічного просідання. Значення мінімальної швидкості у великих суден контейнеровозів може досягати 7-8 вузлів [4]. Це чи не найважливіша техніко-експлуатаційна характеристика при визначенні параметру  $\bar{A}_1$  при плаванні великогабаритного контейнеровозу на циркуляції на мілководді. Саме від цього параметру залежатиме накопичення моменту інерції, значення крену судна, величина динамічного просідання, період циркуляції, діаметр циркуляції, кут дрейфу та ін. [5]. Якщо інші характеристики (довжина, дедвейт, ширина, та ін.) неможливо змінити, то швидкість можна збільшити, або ж зменшити (за допомогою буксиру, чи короткочасної роботи рушіїв на задній хід).

Інерційно-гальмівні параметри судна -  $\bar{A}_2$ , залежать від: відстані, яку проходить судно на запланованій циркуляції, часу руху на запланованій циркуляції, відстані, яку проходить судно при пасивному гальмуванні, часу пасивного гальмування судна, відстані, яку проходить судно при активному гальмуванні та часу активного гальмування судна. Ці значення залежать від конструктивних особливостей, завантаження судна, та його швидкості. Швидкість, як було сказано вище, судноводій може змінювати таким чином покращуючи, чи погіршуючи інерційно-гальмівні параметри.

Параметри  $\bar{A}_3$  - характеризують стійкість судна на циркуляції, та залежать від: площі керма судна, радіусу циркуляції судна, диференту судна на ніс або корму, крену судна, положення полюсу повороту судна відносно центру мас, критичної швидкості судна, утраті швидкості за рахунок просідання на мілководді, утраті посадки судна від крену, просідання

судна на хвилюванні. Знову ж таки - радіус циркуляції, положення полюсу повороту, втрата швидкості від просідання прямо залежать від швидкості судна. Диферент та крен залежать від посадки судна, та також частково від швидкості судна.

Параметри  $\bar{A}_4$  – залежать від: висуву судна на циркуляції, зміщення судна на циркуляції, зворотного зміщення судна на циркуляції, тактичного діаметру циркуляції судна, діаметру циркуляції судна, що встановилася, періоду циркуляції судна та ширини смуги руху судна на циркуляції. Ці величини залежать від конструкційних особливостей судна і від швидкості.

Параметри розташування носа і корми судна на траєкторії руху -  $\bar{A}_5$ , як видно із формули (7), суттєво залежать від розмірів суднового ходу та конструкційних особливостей судна.

Параметри розташування об'єктів в електронній базі ЕКНІС і кінця координатного курсору –  $\bar{A}_6$ , також не можуть бути змінені судноводієм і залежать від точності електронної карти, можливостей програмного забезпечення та точності сигналу ГНСС.

Параметри гідрологічної обстановки –  $\bar{A}_7$ , залежать від місця плавання та мають властивість швидко змінюватись. На них, очевидно, також не можна впливати, проте їх потрібно вміти враховувати та користуватись ними.

Наприклад, на рис. 2 відображено заплановану циркуляцію контейнеровозу (пунктирна лінія) та 10 реальних траєкторій того ж самого судна (кольорові лінії), яке регулярно заходило в один і той самий порт [5].

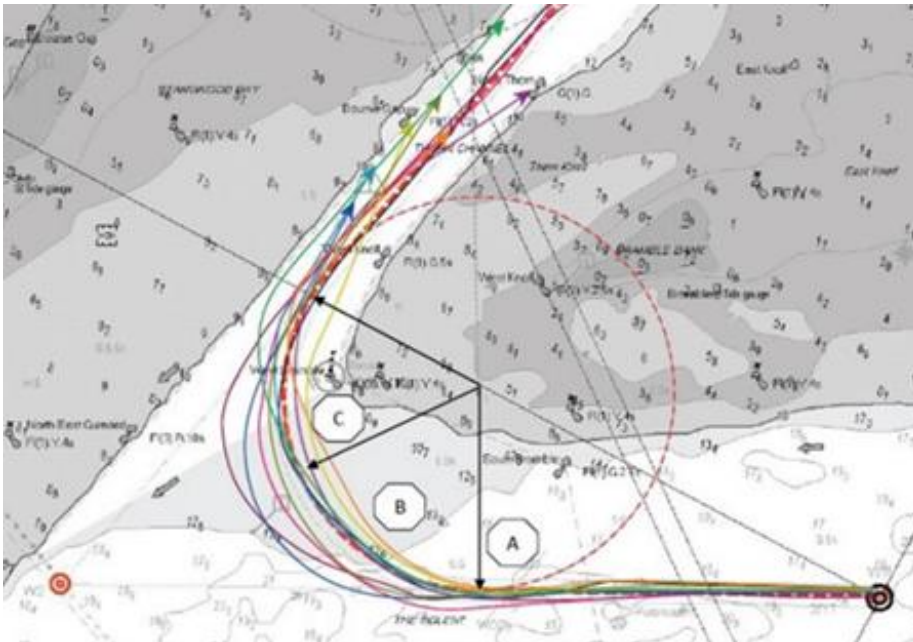


Рисунок 2 – Траєкторія фактичних циркуляцій судна порівняно з запланованою під впливом вітру та течії.

Як видно з рисунку, в більшості випадків, течія значно зносила судно, через що, діаметр циркуляції збільшувався. Навіть емпіричним шляхом не завжди вдається визначити момент переключки керма для здійснення циркуляції запланованою траєкторією. Через те, що швидкість та напрямок течії постійно змінюється та змінюється підводний об'єм судна, кожен раз течія по різному впливає на стійкість судна на циркуляції. Проте, якщо напрямок та швидкість течії постійні, або ж достовірно відомі, її вплив можливо врахувати і робити так, щоб мінімізувати її вплив, або ж зробити так, щоб вона допомагала судну повертати.

Параметри гідрометеорологічних умов -  $\bar{A}_8$ , за своєю природою схожі з гідрологічними параметрами – на них не можна впливати, проте їх можна розраховувати і користуватись ними. Загалом, модель забезпечення безпеки плавання великогабаритних контейнеровозів, як раз таки в більшості залежить від гідрологічних і гідрометеорологічних параметрів. Всі інші параметри

можливо легко прорахувати та більшість з них буде відома відразу після проведення ходових випробувань судна. Наприклад мінімальна швидкість судна, чи ефект просідання судна на міліні. Основні техніко-експлуатаційні характеристики, інерційно-гальмівні параметри, параметри стійкості судна на циркуляції, параметри повороткості судна, параметри розташування носа і корми судна на траєкторії руху, параметри розташування об'єктів в електронній базі ЕКНІС і кінця координатного курсору – всі вони, хоч і впливають на модель забезпечення безпечного руху, але вони відомі. Параметри ж  $\bar{A}_7$  та  $\bar{A}_8$ , часто бувають невідомі, або частково відомі. Вітер може бути шквальний, течія може змінювати напрямок та швидкість, вітрильність контейнеровозу змінюється з кожним портом - в залежності від варіанту завантаження. В лоціях, як правило, пишеться: «течія SW, 1-2 вузли». В прогнозах погоди вказують «Переважно північний вітер від 5 до 10 м/с»[10]. Течія зі швидкістю 2 вузли та вітер швидкістю 10 м/с матимуть в два рази більший вплив на судно ніж 1 вузол, та 5 м/с, відповідно. Туман в районі плавання, в свою чергу, в рази збільшить ризик аварійної морської пригоди. Тож, при розробці моделі забезпечення безпечного руху судна, до розрахунку доцільно брати найгірші з потенційно можливих значення параметрів  $\bar{A}_7$  та  $\bar{A}_8$ . Тоді у судноводія буде можливість підготуватись до найгіршого вірогідного сценарію.

Параметри основних суднових та берегових засобів визначення місця розташування судна на траєкторії руху –  $\bar{A}_9$ , в більшості залежать від якості встановленого обладнання. Але й не слід недооцінювати вміння ефективного використання навігаційного обладнання. Наприклад, неправильно налаштована чутливість радару, призведе до того, що деякі риси берегу не будуть відображатись на екрані РЛС – через це, судноводій не зможе швидко та ефективно перевірити координати судна, отримані за допомогою ГНСС. Знову ж таки, приймач ГНСС може бути налаштований на звичайний режим роботи, а не на диференційний, що може залишитись непоміченим судноводієм і в результаті цього суттєво знизиться ймовірність отримання повної та достовірної інформації про місцезнаходження судна на траєкторії руху.

Параметри зносу судна із запланованої траєкторії циркуляції під впливом накопиченого чинного моменту інерції -  $\bar{A}_{10}$ , залежать від швидкості судна, діаметру циркуляції та водотоннажності судна. Накопичений, діючий момент інерції – це похідна від швидкості. Він збігається з курсом судна на прямому ході. При поворотах, особливо різких, вектор дії сили може відрізнятись від курсу судна до 30-40 градусів, що викликає дрейф судна в протилежний бік повороту. Діаметр циркуляції, в свою чергу, залежить від кута перекладки керма та швидкості. Чим більший кут перекладки керма та чим вища швидкість, тим більша буде різниця між курсом судна та вектором дії сили накопиченого моменту інерції судна і тим більшою буде вірогідність відхилення від запланованої траєкторії циркуляції [11].

Параметри роботи буксирів і підрулюючих пристроїв -  $\bar{A}_{11}$ , залежать від потужності буксирів, потужності підрулюючих пристроїв та положення полюса повороту судна відносно центру мас. Момент сили від роботи кожного з буксирів залежить від того, з якою потужністю працюють буксири та від положення полюса повороту. Це проілюстровано на рис. 3 [12].

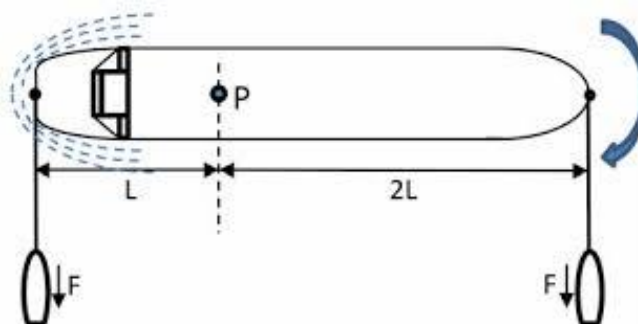


Рисунок 3 – Полюс повороту судна та робота буксирів.

Як видно з рисунку, плече сили носового буксиру вдвічі більше ніж плече сили кормового буксиру. Тому при роботі з однаковою потужністю, момент сили носового буксиру буде вдвічі більшим за момент сили кормового буксиру, що змусить судно повертати праворуч. Для того, аби змусити судно рухатись латеральне (ніс та корма мають рухатись в напрямку дії вектору сили обох буксирів з однаковою швидкістю), можливо наказати капітану носового буксиру зменшити зусилля вдвічі. Або ж, збільшувати швидкість судна до тих пір, поки полюс повороту не досягне тієї точки, коли плечі сили обох буксирів будуть рівними. Знання властивостей положення та зміни положення полюсу повороту є ключовим навиком судноводіїв при маневруванні великогабаритного судна на мілководді та в стиснених умовах. Це знання дає змогу ефективно приймати відповідні рішення та давати керуючі сигнали, які забезпечують безпеку плавання судна.

Основною вимогою, що висувається до розглянутої системи забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі у складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умовах є досягнення всіма показниками безпеки своїх найкращих значень. При цьому в загальному випадку повинні бути виконані такі умови:

$$l_{нс} \rightarrow \min, l_{кс} \rightarrow \min, D_{но} \rightarrow \max, P_{мс} \rightarrow \max, \quad (14)$$

З вищевикладеного стає очевидним, що досягнення поставленої мети – забезпечення навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі у складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умовах досягається безліччю різних параметрів, тобто постає завдання багатокритеріальної оптимізації. На практиці досить поширений підхід до побудови критерію [13, 14], у якому від кількох показників переходять до однієї багатоцільової функції  $F(T)$  цих показників-так зване згортання показників. Надалі при розвитку теми передбачається виділення серед показників двох головних і переведення інших у розряд обмежень.

При заданих параметрах:  $\bar{A}_1 - \bar{A}_4, \bar{A}_6 - \bar{A}_{11}$  необхідно мінімізувати відхилення носа та корми судна від запланованої траєкторії руху під впливом складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умов плавання та накопиченого чинного моменту інерції за такими критеріями:

$$J_1 = l_{нс} \rightarrow \min, J_2 = l_{кс} \rightarrow \min, \quad (15)$$

При заданих обмеженнях:

$$D_{но} \geq D_{зад.}, P_{мс} \geq P_{зад.}, \quad (16)$$

$$\bar{A}_5 = (V_{сх}, l_{нс}, l_{кс}, T_{пр}, \varphi_{нс}, \lambda_{нс}, \varphi_{кс}, \lambda_{кс}, M_0), \quad (17)$$

$$\bar{A}_{10} = (F_{в}, M_{в}, R_{к}, M_{к}, V_{пц}, V_{кц}, V_{нц}, M_i), \quad (18)$$

**Висновки.** На підставі запропонованого підходу до вибору показників навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна у мілководному стиснутому районі при складних навігаційно-гідрографічних та гідрометеорологічних умовах стане можливим:

1. Врахувати значну кількість різнорідних показників, що прямо чи опосередковано впливають на навігаційну безпеку плавання великогабаритного контейнерного судна;
2. Створити математичну модель навігаційної безпеки плавання великогабаритного контейнерного судна, що встановлює алгоритмічну залежність між її вихідним ефектом та сукупністю параметрів, що пропонуються для дослідження;
3. Надалі, на підставі аналізу можливостей математичної моделі, розробити алгоритми та практичні рекомендації щодо покращення критеріїв її роботи, у тому числі, щодо автоматизації

процесів керування судном за допомогою можливостей штучного інтелекту шляхом формування ним у ЕКНІС виконавчих сигналів керування на засоби керування напрямком руху і рушії судна в разі відсутності реакції на небезпечну ситуацію, що складається, з боку вахтового помічника капітана або капітана судна, за ознаками відсутності маневру судна, яка може бути пов'язана з їх обмеженими фізичними можливостями або промахами в розрахунках і оцінки ситуації за інформацією від інших менш точних засобів судноводіння. Це призводить до завчасної автоматичної зміни курсу та (або) швидкості судна для безпечного проходження кінцівками судна навігаційних небезпек.

## ЛІТЕРАТУРА

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.
2. Давидов В.С. Повышение эффективности эксплуатации функциональной системы: специализированное судно управления – глубоководный подводный аппарат путем использования высокоточных систем позиционирования/ Давыдов В.С., Демичев В.В.//Водный транспорт.- К.:КДАВТ,2016.-№2(25).-С. 48-53.
3. Богомья В.І. Пути повышения эффективности функционирования украинских космических систем наблюдения Земли. /Богомья В.И., Давыдов В.С., Загорулько А.Н. и др.// Водный транспорт. – К.: КДАВТ, 2010. – №11. –С.5-11.
4. China Shipbuilding Corporation, Maneuvering information for USCG, K3979103, 2004 p. 3;
5. Jasna Prpić-Oršić, Joško Parunov, Igor Šikić, Operation of ULCS - real life, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2014) 6:1014~1023, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0228>, pISSN: 2092-6782.
7. Zhou, Y.; Daamen, W.; Vellinga, T.; Hoogendoorn, S.P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. Ocean Eng. 2020, 213, 107774.
8. Ming-Chung Fang; Jhih-Hong Luo; Ming-Ling Lee A Nonlinear Mathematical Model for Ship Turning Circle Simulation in Waves. Journal of Ship Research, 2005, <https://doi.org/10.5957/jsr.2005.49.2.69>, p.69-79.
9. Yasuo Yoshimura, Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion, Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction August, Tokyo, 2005, p. 1-6 с.
10. United Kingdom Hydrographic Office, Mariner's Handbook, Taunton, UK, 2020, p. 103.
11. Nathanael Esnault; Nitish Patel; Jon Tunnicliffe, Steering Induced Roll Quantification During Ship Turning Circle Manoeuvre, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560998, 2021.
12. Frost A., Practical Navigation for Officers of the Watch, Brown, Son & Ferguson LTD., Glasgow, 2023, p. 347.
13. Сиразетдинов Т.К. Методы решения многокритериальных задач синтеза технических систем. / Сиразетдинов Т.К. – М.: Машиностроение, 1988.- 158 с.
14. Дятлов Г.И. Вероятностные основы моделирования сложных систем. / Дятлов Г.И., Кудрицкий В.Д.// К.: КВВАИУ, 1992.–530 с.

## REFERENCES

1. European Maritime Safety Agency, Annual overview of marine casualties and incidents 2021, 2022, Praça Europa 4, Lisbon Portugal Ares(2022).- P.1-14.
2. Davydov V.S., Increasing the operating efficiency of a functional system: a specialized control vessel - a deep-sea underwater vehicle through the use of high-precision positioning systems, KDAVT. Collection of scientific works "Vodnyi Transport", vol. 2016.-№2(25).-P. 48-53.
3. Bogomya V.I., Ways to improve the efficiency of the functioning of Ukrainian space Earth observation systems. / Bogomya V.I., Davydov V.S., Zagorulko A.N. a.o.// KDAVT. Collection of scientific works "Vodnyi Transport", vol.2010 – №11. –P.5-11.

4. China Shipbuilding Corporation, Maneuvering information for USCG, K3979103, 2004 p. 3;
5. Jasna Prpić-Oršić, Joško Parunov, Igor Šikić, Operation of ULCS - real life, Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng. (2014) 6:1014~1023, <http://dx.doi.org/10.2478/IJNAOE-2013-0228>, pISSN: 2092-6782;
7. Zhou, Y.; Daamen, W.; Vellinga, T.; Hoogendoorn, S.P. Impacts of wind and current on ship behavior in ports and waterways: A quantitative analysis based on AIS data. Ocean Eng. 2020, 213, 107774;
8. Ming-Chung Fang; Jih-Hong Luo; Ming-Ling Lee A Nonlinear Mathematical Model for Ship Turning Circle Simulation in Waves. Journal of Ship Research, 2005, <https://doi.org/10.5957/jsr.2005.49.2.69>, p.69-79.
9. Yasuo Yoshimura, Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion, Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction August, Tokyo, 2005, p. 1-6 c.
10. United Kingdom Hydrographic Office, Mariner's Handbook, Taunton, UK, 2020, p. 103.
11. Nathanael Esnault; Nitish Patel; Jon Tunnicliffe, Steering Induced Roll Quantification During Ship Turning Circle Manoeuvre, 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9560998, 2021.
12. Frost A., Practical Navigation for Officers of the Watch, Brown, Son & Ferguson LTD., Glasgow, 2023, p. 347.
13. Sirazetdinov T.K., Methods for solving multicriteria problems of synthesis of technical systems. / Sirazetdinov T.K., – M., Mashynostroenie, 1988.- 158 c.
14. Dyatlov G.I., Probabilistic foundations for modeling complex systems. / Dyatlov G.I., Kudritsky V.D. // K.: KVVAIU, 1992 – 530 p.

**Davydov V.S., Klindukhova V.M., Lyashko O.V., Liubarets I.O.**

## **ON THE CREATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR THE MOVEMENT OF LARGE-FORMAT CONTAINER SHIP IN SHALLOW WATER RESTRICTED AREAS UNDER COMPLEX NAVIGATION, HYDROGRAPHIC, AND HYDROMETEOROLOGICAL CONDITIONS OF NAVIGATION**

*The article discusses the problem of ensuring navigational safety for large container ships under complex navigation, hydrographic, and hydrometeorological conditions. The authors point out that the implementation of Electronic Chart and Navigation Information Systems (ECDIS) and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) has not led to a significant reduction in ship accidents, especially during shallow water operations. Objective factors that significantly complicate the safe navigation of large vessels are considered, including limitations in the operation of the main propulsion plant and navigational characteristics. The presence of a high windage also complicates ship course-keeping. Vessel design features, such as a long stopping distance and the presence of only one propeller shaft, also have a negative impact on their maneuverability and safety. It is noted that GNSS capabilities are underutilized for trajectory correction and real-time navigation tasks. The dimensions of channels and fairways do not always correspond to the sizes of modern vessels, leading to constraints on the maneuverability and the risk of grounding during navigation.*

*The article proposes an approach to evaluating the indicators of navigational safety for large container ships by developing a mathematical model that would improve their safety in complex conditions. The authors also mention the possibility of using artificial intelligence to automate ship control processes in hazardous situations. The presented mathematical model of the movement of large container ships requires further development and further research and development to improve the safety of navigation for such vessels.*

**Keywords:** navigation safety, navigation, mathematical motion model, challenging conditions, large-scale, container ship.